



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**PENGINDERAAN SPEKTRUM TERDISTRIBUSI UNTUK  
JARINGAN RADIO KOGNITIF PADA TRAFIK HETEROGEN**

**Saut Martua Jahenda Siringoringo**  
**2212105069**

**Dosen pembimbing**  
**Dr. Ir. Wirawan, DEA**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2015**



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - TE 141599**

**DISTRIBUTED SPECTRUM SENSING FOR COGNITIVE RADIO  
NETWORKS WITH HETEROGENEOUS TRAFFIC**

**Saut Martua Jahenda Siringoringo**  
**2212105069**

**Supervisor**  
**Dr. Ir. Wirawan, DEA**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING**  
**Faculty of Industrial Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2015**



**PENGINDERAAN SPEKTRUM TERDISTRIBUSI UNTUK  
JARINGAN RADIO KOGNITIF PADA TRAFIK HETEROGEN**

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui :**

**Dosen Pembimbing,**

**Dr. Ir. Wirawan, DEA**

**NIP. 19631109 1989031 011**

**SURABAYA  
JANUARI 2015**

## **PENGINDERAAN SPEKTRUM TERDISTRIBUSI UNTUK JARINGAN RADIO KOGNITIF PADA TRAFIK HETEROGEN**

Nama : Saut Martua Jahenda Siringoringo  
Pembimbing : Dr. Ir. Wirawan, DEA.

### **ABSTRAK**

Spektrum frekuensi merupakan sumber daya terbatas dimana alokasi frekuensi masing-masing diatur oleh badan regulasi. Dengan keterbatasan alokasi spektrum frekuensi, pada kenyataannya pengguna primer sebagai pemilik lisensi spektrum tidak sepenuhnya memanfaatkan pada waktu dan lokasi geografis tertentu sehingga pemanfaatan spektrum tidak efisien. Konsep radio kognitif diusulkan untuk mengatasi permasalahan diatas.

Pada Penelitian ini dianalisis kinerja *spectrum sensing* yang dilakukan pengguna sekunder dengan menggunakan teknik *matched filter* dengan parameter pemancar dan penerima yang digunakan berdasarkan IEEE 802.16e. Dari kondisi pengguna sekunder juga, kebutuhan trafik berkembang mengarah kepada trafik heterogen sehingga dibutuhkan pengembangan teknologi dan standard yang menyediakan *dynamic automatic network selection decision*. Untuk itu dibutuhkan suatu strategi optimal yang dapat memodelkan bagaimana interaksi dari pengguna sekunder dimana dalam hal ini dimodelkan sebagai pengguna *heavy traffic* dan pengguna *light traffic* sehingga dicapai suatu keputusan yang rasional untuk mau berkontribusi dalam *cooperative sensing*.

Dari simulasi didapatkan ROC pada kanal AWGN dengan SNR dari -20dB sampai dengan 20dB. SNR yang berubah-ubah tergantung pada jarak pengguna sekunder terhadap base station primer. Untuk kondisi pengguna sekunder juga dengan menggunakan *non-cooperative game theory* dalam hasil simulasi menunjukkan ketika probabilitas pengguna *heavy traffic* dan *light traffic* sama-sama 0.5 maka diperoleh satu titik *nash equilibrium* sehingga respon terbaik dari strategi yang dilakukan kedua pemain untuk mau berkontribusi dalam *cooperative sensing* adalah pengguna *heavy traffic* tidak melakukan “sense” dan pengguna *light traffic* melakukan “sense”.

Kata Kunci: Radio Kognitif, Penginderaan Spektrum, Matched Filter, Teori Permainan

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

# **DISTRIBUTED SPECTRUM SENSING DOR COGNITIVE RADIO NETWORKS WITH HETEROGENEOUS TRAFFIC**

Name : Saut Martua Jahenda Siringoringo  
Supervisor : Dr. Ir. Wirawan, DEA.

## **ABSTRACT**

Frequency spectrum is a finite resource where each spectrum allocation set by regulatory agencies. With the limited frequency spectrum allocation, and in the fact that primary user as a licensed user doesn't fully use all the time so this is become inefficient spectrum utilization. The concept of cognitive radio is proposed to handle this problems.

On this research is analyzed the performance of spectrum sensing performed by secondary users using the matched filter technique with a transmitter and receiver parameters are used based on IEEE 802.16e. From the condition of secondary users as well, growing traffic needs of the heterogeneous traffic that leads to the need to develop technologies and standards that provide dynamic automatic network selection decision. That requires an optimal strategy that can model the interactions of secondary users which in this case is modeled as heavy user traffic and traffic light so that users achieve a rational decision to want to contribute to cooperative sensing.

From the simulation, for the SNR -20 dB until 20 dB can get ROC in AWGN channel. SNR varies depending on the distance of the secondary users to the primary base station. For the condition of secondary users can also use a non-cooperative game theory in simulation results show when the probability of heavy users and light traffic traffic equally 0.5 then obtained a nash equilibrium point so that the best response strategy by both players to want to contribute to cooperative sensing is heavy user traffic does not "sense" and a traffic light users perform a "sense".

Key words: Cognitive Radio, Spectrum Sensing, Matched Filter, Game Theory

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur senantiasa penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, atas segala rahmat dan kasih yang telah diberikanNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul :

### **“PENGINDERAAN SPEKTRUM TERDISTRIBUSI UNTUK JARINGAN RADIO KOGNITIF PADA TRAFIK HETEROGEN”**

Tugas akhir ini dibuat untuk memenuhi persyaratan mendapatkan gelar Strata I pada jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa buku ini jauh dari sempurna, oleh sebab itu saran dan kritik yang bersifat membangun senantiasa dinantikan. Harapan penulis adalah semoga apa yang telah dituangkan dalam buku ini dapat bermanfaat bagi penulis dan rekan-rekan mahasiswa khususnya serta para pembaca pada umumnya. Penulis juga berharap agar tugas akhir ini dapat dikembangkan lebih lanjut sehingga dapat digunakan sebaik-baiknya untuk mendukung perkembangan ilmu pengetahuan.

Akhirnya tidak lupa penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan dan dukungan hingga terselesaikannya tugas akhir ini.

Surabaya, Januari 2015

Penulis



*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR KEASLIAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xix</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	2
1.4 Tujuan .....	3
1.5 Metode Penelitian .....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	4
1.7 Relevansi .....	4
<b>BAB II TEORI PENUNJANG.....</b>	<b>7</b>
2.1 Radio Kognitif .....	7
2.2 <i>Spectrum Sensing</i> .....	12
2.2.1 <i>Spectrum Sensing</i> Terdistribusi .....	13
2.2.2 <i>Transmitter Detection</i> .....	13
2.3 IEEE 802.16 .....	15
2.4 <i>Binary Phase Shift Keying (BPSK)</i> .....	16
2.5 <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)</i> .....	18
2.6 <i>Matched Filter Detection</i> .....	19
2.6.1 <i>Pulse Shaping</i> .....	21
2.6.2 <i>Raise Cosine Filter</i> .....	22
2.6.3 <i>Matched Filter</i> .....	22
2.7 <i>Additive White Gaussian Noise (AWGN)</i> .....	23
2.8 <i>Signal to Noise Ratio(SNR)</i> .....	25
2.9 Trafik .....	26
2.10 Distribusi Trafik.....	27
2.10.1 Distribusi Eksponensial .....	28
2.10.2 Distribusi Poisson .....	29

2.10.3 Hubungan Distribusi Poisson dengan Distribusi Eksponensial .....	30
2.11 Teori Permainan.....	30
2.11.1 <i>Nash Equilibrium</i> .....	32
<b>BAB III PEMODELAN DAN SIMULASI SISTEM.....</b>	<b>35</b>
3.1 Metode Perencanaan Sistem .....	37
3.2 Parameter Sistem .....	38
3.3 <i>Spectrum Sensing</i> menggunakan <i>Matched Filter</i> .....	38
3.3.1 Pemancar OFDM .....	39
3.3.2 Bit Generator .....	40
3.3.3 <i>Serial to Parallel</i> .....	41
3.3.4 Modulasi BPSK .....	42
3.3.5 <i>Invers Fast Fourier Transform</i> .....	43
3.3.6 <i>Raise Cosine Filter</i> .....	43
3.3.7 <i>Receiver Secondary User</i> .....	45
3.3.8 Kanal AWGN .....	45
3.3.9 <i>Matched Filter</i> .....	46
3.3.10 Ambang Batas Deteksi .....	47
3.4 Pembangkitan <i>Secondary User</i> .....	48
3.5 Kondisi Trafik <i>Secondary User</i> .....	50
3.6 <i>Non-cooperative Game</i> untuk <i>Cooperative Sensing</i> .....	52
3.7 Penambahan Jumlah $K_1$ dan $K_2$ .....	58
3.8 Skenario Pengujian .....	60
<b>BAB IV ANALISIS dan PEMBAHASAN .....</b>	<b>61</b>
4.1 <i>Spectrum Sensing</i> menggunakan <i>Matched Filter Detection</i> ..	61
4.1.1 <i>Probability of False Alarm</i> .....	61
4.1.2 SNR .....	64
4.2 Pengaruh <i>noncooperative game</i> dalam <i>cooperative sensing</i> ..	66
4.3 Pengaruh <i>noncooperative game</i> dalam pengguna sekunder ..	67
4.4 Pengaruh banyaknya pengguna sekunder .....	71
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>79</b>
5.1 Kesimpulan.....	79
5.2 Saran .....	79
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>81</b>
<b>LAMPIRAN A : Proposal Tugas Akhir .....</b>	<b>83</b>

<b>LAMPIRAN B : Listing Program .....</b>	<b>103</b>
<b>LAMPIRAN C : Tabel Pengujian.....</b>	<b>117</b>
<b>RIWAYAT HIDUP .....</b>	<b>129</b>

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Rate Parameter 802.16 .....	16
Tabel 2.2	Komponen <i>Game Theory</i> .....	30
Tabel 2.3	Kategori Pendekatan <i>Game Theory</i> .....	31
Tabel 2.4	Mencari Sebuah <i>Nash Equilibrium</i> .....	33
Tabel 3.1	Spesifikasi Perangkat Transceiver 802.16e .....	49
Tabel 3.2	Jarak dan SNR dari <i>Secondary User</i> terhadap <i>Primary Base Station</i> .....	49
Tabel 3.3	$P_{fa}$ <i>Secondary User</i> terhadap <i>Primary Base Station</i> ...	55
Tabel 3.4	$P_{fa}$ <i>Secondary User</i> terhadap <i>Primary Base Station</i> Dengan aturan “OR” .....	56
Tabel 3.5	<i>Payoff Heavy Traffic User</i> Melakukan <i>Sensing</i> dan Tidak Melakukan <i>Sensing</i> .....	56
Tabel 3.6	<i>Payoff Light Traffic User</i> Melakukan <i>Sensing</i> dan Tidak Melakukan <i>Sensing</i> .....	57
Tabel 3.7	Utilitas rata-rata <i>Heavy Traffic User</i> Melakukan <i>Sensing</i> dan Tidak Melakukan <i>Sensing</i> ....	57
Tabel 3.8	Utilitas rata-rata <i>Light Traffic User</i> Melakukan <i>Sensing</i> dan Tidak Melakukan <i>Sensing</i> ....	58
Tabel 3.9	Utilitas rata-rata dengan $K_1=1$ dan $K_2=1$ .....	58
Tabel 3.10	Utilitas rata-rata dengan $K_1=2$ dan $K_2=2$ .....	59
Tabel 3.11	Utilitas rata-rata dengan $K_1=3$ dan $K_2=3$ .....	59
Tabel 3.12	Utilitas rata-rata dengan $K_1=4$ dan $K_2=4$ .....	60
Tabel 4.1	Perubahan Nilai $P_{fa}$ terhadap <i>Threshold</i> dan $P_d$ .....	62
Tabel 4.2	Perubahan Nilai SNR Sistem .....	64
Tabel 4.3	<i>Throughput</i> $R_{Ho}(T_s)$ .....	66
Tabel 4.4	<i>Throughput</i> $R_H(T_s)$ .....	66



*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konsep <i>Spectrum Holes</i> .....	8
Gambar 2.2	Dasar Lingkungan Kognitif.....	9
Gambar 2.3	Arsitektur Radio Kognitif.....	10
Gambar 2.4	Klasifikasi dari teknik <i>spectrum sensing</i> .....	12
Gambar 2.5	Ilustrasi dari <i>spectrum sensing</i> terdistribusi.....	13
Gambar 2.6	Titik konstelasi BPSK .....	16
Gambar 2.7	Modulator BPSK .....	17
Gambar 2.8	OFDM <i>subcarrier</i> dalam domain frekuensi .....	18
Gambar 2.9	Blok Diagram dari Model OFDM .....	19
Gambar 2.10	Blok Diagram untuk <i>Matched Filter Detection</i> .....	20
Gambar 2.11	Respon Impuls <i>Matched Filter</i> .....	23
Gambar 2.12	Blok Diagram <i>Matched Filter</i> .....	23
Gambar 2.13	PDF <i>Gaussian</i> .....	24
Gambar 2.14	Model Kanal AWGN.....	25
Gambar 2.15	Kurva PDF Distribusi Eksponensial .....	28
Gambar 2.16	Kurva PDF Distribusi Poisson.....	29
Gambar 3.1	Skenario dan Model Sistem .....	35
Gambar 3.2	Skema <i>Cooperative Spectrum Sensing</i> .....	36
Gambar 3.3	Blok Diagram Perancangan Sistem .....	37
Gambar 3.4	Diagram Alir <i>Spectrum Sensing</i> Menggunakan <i>Matched Filter</i> .....	39
Gambar 3.5	Blok Diagram Pemancar OFDM .....	39
Gambar 3.6	Diagram Alir Pembuatan <i>Transmitter</i> .....	40
Gambar 3.7	Input Bit pada Sistem OFDM .....	41
Gambar 3.8	Blok Diagram <i>Serial to Parallel</i> .....	42
Gambar 3.9	Sinyal BPSK.....	42
Gambar 3.10	Titik Konstelasi BPSK.....	43
Gambar 3.11	Respon Impuls <i>Raise Cosine Filter</i> .....	44
Gambar 3.12	Sinyal OFDM .....	44
Gambar 3.13	Blok Diagram <i>Receiver Secondary User</i> .....	45
Gambar 3.14	Sinyal OFDM Melewati Kanal AWGN.....	45
Gambar 3.15	Blok Diagram <i>Matched Filter</i> .....	46
Gambar 3.16	Sinyal Keluaran dari <i>Matched Filter</i> .....	47
Gambar 3.17	Level <i>Threshold</i> pada Sinyal <i>Matched Filter</i> .....	48
Gambar 3.18	Lokasi <i>Secondary User</i> terhadap <i>Primary Base Station</i> .....	50

Gambar 3.19	Skema <i>Spectrum Sensing</i> pada <i>Heavy Traffic</i> .....	50
Gambar 3.20	Skema <i>Spectrum Sensing</i> pada <i>Light Traffic</i> .....	51
Gambar 4.1	ROC untuk Wimax dengan berbagai variasi SNR.....	61
Gambar 4.2	Perbandingan $P_{fa}$ dengan <i>threshold</i> saat SNR 10 dB .....	63
Gambar 4.3	Perbandingan $P_d$ dengan <i>threshold</i> saat SNR 10 dB .....	63
Gambar 4.4	Level <i>Threshold</i> pada SNR -10dB.....	64
Gambar 4.5	Level <i>Threshold</i> pada SNR -10dB.....	65
Gambar 4.6	Perbandingan SNR dengan $P_d$ .....	65
Gambar 4.7	<i>Payoff</i> pengguna <i>heavy traffic</i> melakukan “sense” dan “nonsense” .....	67
Gambar 4.8	<i>Payoff</i> pengguna <i>light traffic</i> melakukan “sense” dan “nonsense” .....	68
Gambar 4.9	Utilitas rata-rata pengguna <i>heavy traffic</i> melakukan “sense” dan “nonsense” .....	71
Gambar 4.10	Utilitas rata-rata pengguna <i>light traffic</i> melakukan “sense” dan “nonsense” .....	72
Gambar 4.11	Utilitas rata-rata dengan $K_1=1$ dan $K_2=1$ .....	76
Gambar 4.12	Utilitas rata-rata dengan $K_1=2$ dan $K_2=2$ .....	76
Gambar 4.13	Utilitas rata-rata dengan $K_1=3$ dan $K_2=3$ .....	77
Gambar 4.14	Utilitas rata-rata dengan $K_1=4$ dan $K_2=4$ .....	77

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Tuntutan komunikasi nirkabel yang handal dan kapasitas sistem yang tinggi tidak terlepas dari ketersediaan *resource* berupa spektrum frekuensi yang cukup. Pengelolaan spektrum yang efisien dan ketersediaan spektrum yang semakin terbatas menjadi latar belakang terciptanya konsep radio kognitif. Pada sistem komunikasi nirkabel, spektrum frekuensi memegang peranan penting sebagai media pembawa informasi antara pemancar dan penerima pada jarak tertentu. Perkembangan teknologi khususnya teknologi perangkat nirkabel yang semakin maju mengakibatkan semakin beragamnya informasi baik berupa suara, data dan video yang dilewatkan pada spektrum frekuensi. Hal ini nantinya yang akan mengakibatkan kebutuhan jalur frekuensi juga semakin meningkat.

Di berbagai negara, akses terhadap sumber daya radio diatur oleh lembaga pemerintah. Spektrum diberikan kepada jaringan penyedia layanan, organisasi ataupun lembaga-lembaga baik swasta maupun milik pemerintah. Dari studi yang dilakukan oleh FCC dan studi independen di beberapa negara menunjukkan bahwa sebagian besar pita frekuensi tidak termanfaatkan secara efisien. Sebagai contoh, di sebagian besar negara di dunia pita jaringan selular sangat padat sementara radio amatir dan frekuensi paging sangat jarang dimanfaatkan. Hal ini mendorong berkembangnya radio kognitif.

Dalam sistem radio kognitif, *spectrum sensing* merupakan salah satu fungsi utama yang dapat digunakan sebagai mekanisme untuk mendeteksi kekosongan spektrum. Spektrum frekuensi adalah sumber daya terbatas sehingga pengalokasian dan pemanfaatannya telah diatur oleh badan dunia seperti *International Telecommunication Union* (ITU). Agar pemanfaatan frekuensi tersebut tidak mengganggu pengguna utama maka peranan *spectrum sensing* bagi pengguna sekunder dapat memanfaatkan frekuensi kosong pada waktu tertentu dimana pengguna utama tidak memanfaatkannya dapat dilakukan.

Seiring perkembangan waktu kebutuhan trafik juga berkembang mengarah kepada trafik heterogen. Dengan adanya multi *user*, multi teknologi, multi aplikasi, multi *provider environment* sekarang ini maka dibutuhkan pengembangan teknologi dan standard yang menyediakan

*dynamic automatic network selection decision*. Untuk itu dibutuhkan suatu teknik yang dapat memodelkan bagaimana interaksi dari pengguna trafik biasa dan pengguna trafik padat, sehingga dicapai suatu keputusan yang rasional untuk dilakukannya *sensing*.

Seiring perkembangan waktu perkembangan jaringan yang semula dari jaringan telepon terpusat (*centralized*) menjadi jaringan internet yang terdesentralisasi (alasan skalabilitas). Desentralisasi atau deregulasi menjadi faktor kunci adanya pertimbangan tingkah laku setiap pengguna. Dalam kenyataannya selalu ada pengguna yang egois yang mencoba untuk mengubah tingkah laku mereka semata-mata demi keuntungan mereka sendiri dan dapat saja mengorbankan kinerja jaringan. Bagaimana menganalisis ini, bagaimana mengontrol dan mencegah hal seperti ini, inilah menjadi tujuan dikenalnya *non-cooperative game theory*.

## **1.2 Perumusan Masalah**

Sebagaimana dijelaskan dalam latar belakang, *spectrum sensing* merupakan salah satu fungsi utama yang dapat digunakan sebagai mekanisme untuk mendeteksi kekosongan spektrum. Untuk itu perlu dilakukan pengkajian dan evaluasi mengenai:

1. Teknik *spectrum sensing* menggunakan *matched filter detection*
2. Bagaimana menstruktur dan menganalisis masalah pemilihan strategi yang diambil oleh pengguna trafik biasa (*light traffic*) dan pengguna trafik padat (*heavy traffic*) dalam hubungannya dengan *non-cooperative game theory*.

## **1.3 Batasan Masalah**

Batasan permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Asumsi *spectrum sharing* dan *spectrum handoff* tidak ada permasalahan dan dianggap ideal.
2. Arsitektur jaringan kognitif radio yang digunakan yaitu arsitektur radio kognitif terdistribusi dan tidak dilakukan perbandingan dan analisis dengan arsitektur radio kognitif *centralized* (terpusat).
3. Terdapat banyak teknik atau aturan yang dipakai dalam *spectrum sensing* maka dalam tugas akhir ini hanya digunakan dengan menggunakan *matched filter*.

4. Teori permainan yang digunakan adalah *non-cooperative game theory*.
5. Interaksi dan pengetahuan dari pengguna *heavy traffic* dan pengguna *light traffic* sudah ditentukan.

#### 1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah mengetahui kinerja *spectrum sensing* menggunakan metode deteksi *matched filter* dan mengetahui bagaimana perilaku pengguna *light traffic* dan pengguna *heavy traffic* dalam memanfaatkan *spectrum sensing* dalam jaringan radio kognitif. Dari perilaku dan interaksi dari kedua pengguna ini dapat dilakukan analisis proses pengambilan keputusan dari *game theory* yang dilakukan.

#### 1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur  
 Pada tahap ini akan dipelajari secara rinci hal-hal sebagai berikut:
  - a. Jaringan dan komunikasi radio kognitif
  - b. Penginderaan spektrum menggunakan metode deteksi *matched filter*.
  - c. Pemodelan *game theory* pada pengguna *light traffic* dan pengguna *heavy traffic*.
2. Simulasi  
 Simulasi Penginderaan Spektrum Terdistribusi untuk Jaringan Radio kognitif pada Trafik Heterogen ini dilakukan menggunakan bahasa pemrograman MATLAB versi 8.0.0.783
3. Pengolahan data hasil simulasi dan analisa  
 Melakukan pengolahan data dan analisa yang diperoleh dari hasil simulasi yang terdiri dari:
  - a. ROC untuk wimax pada berbagai variasi SNR.
  - b. Perbandingan  $P_{fa}$  dengan level *threshold*.
  - c. Perbandingan  $P_d$  dengan level *threshold*.
  - d. Pengaruh  $R_{Ho}(T_s)$  dan  $R(T_s)$  dalam *non-cooperative game theory*
  - e. *Nash equilibrium* dari matriks *payoff* yang dibuat



4. Penarikan kesimpulan  
Kesimpulan mengenai Penginderaan Spektrum Terdistribusi untuk Jaringan Radio kognitif pada Trafik Heterogen dapat diambil dengan melihat hasil komputasi dan analisa.
5. Penulisan buku tugas akhir  
Pada tahap akhir semua tahap yang telah dilalui akan ditulis dalam buku tugas akhir yang mencakup seluruh materi yang ada.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Buku laporan tugas akhir ini terdiri dari 5 (lima) bab, dimana masing-masing bab mempunyai kaitan satu sama lain, yaitu:

**BAB I : Pendahuluan**

Pada bab ini dijelaskan tentang latar belakang, tujuan, perumusan masalah, batasan masalah, metodologi dan sistematika penulisan

**BAB II : Teori Penunjang**

Pada bab ini dijelaskan tentang teori dasar radio kognitif, trafik, *game theory* dan sistem dari *spectrum sensing* beserta metode deteksi yang digunakan.

**BAB III : Metodologi**

Pada bab ini dijelaskan tentang metode dan parameter-parameter yang digunakan Penginderaan Spektrum Terdistribusi untuk Jaringan Radio kognitif pada Trafik Heterogen

**BAB IV : Hasil dan Analisa**

Pada bab ini dijelaskan tentang hasil dan analisis data yang didapatkan dari BAB III

**BAB V : Penutup**

Berisi kesimpulan dari hasil dan analisis data pada BAB IV dan saran yang bisa dilakukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

## **1.7 Relevansi**

Manfaat dari tugas akhir ini adalah:

1. Memberikan pembelajaran dan penelitian mengenai teknologi radio kognitif sebagai bahan untuk penelitian selanjutnya.

2. Memberikan referensi dalam melakukan *spectrum sensing* dapat dilakukan dengan metode deteksi *matched filter*.
3. Mengetahui perilaku pengguna radio kognitif dalam pendekatan menggunakan *game theory*.

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

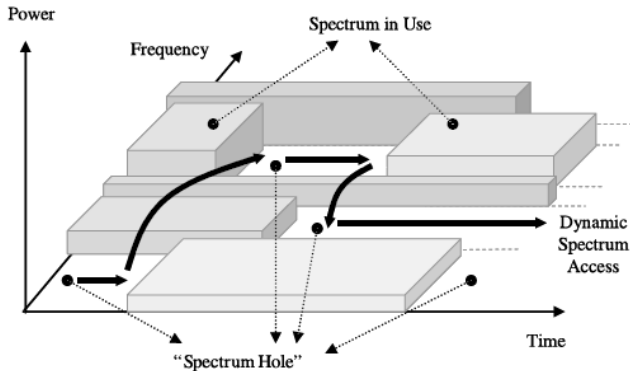
## BAB II

### TEORI PENUNJANG

#### 2.1 Radio kognitif

Radio kognitif merupakan perkembangan teknologi jaringan komunikasi nirkabel yang dapat memanfaatkan sumber daya terbatas menjadi lebih efisien dan fleksibel. Radio kognitif memperkenalkan sebuah sistem komunikasi nirkabel cerdas yang memiliki kemampuan melakukan adaptasi dengan lingkungan dan mengambil tindakan yang diperlukan untuk memenuhi kepentingannya. Ada beberapa karakteristik dari radio kognitif, pertama bersifat kognitif. Disini dijelaskan tentang kemampuan untuk merasakan dan mengambil informasi dari lingkungan sekitarnya. Informasi yang dimaksud dapat berupa frekuensi transmisi, *bandwidth*, daya pancar dan strategi modulasi secara *real-time*. Kedua, memiliki kemampuan rekonfigurasi yakni kemampuan dalam mengadaptasi parameter operasional dengan cepat terhadap informasi yang telah dirasakan untuk mendapatkan performansi yang optimal. Ketiga, memiliki kemampuan *self-management* yakni kemampuan radio kognitif untuk beradaptasi dengan lingkungan sekitar tanpa instruksi dari entitas pusat manajemen sehingga dapat mengurangi kompleksitas sistem.

Radio kognitif (*Cognitive Radio* atau CR) pertama kali diperkenalkan oleh Joseph Mitola yang menyebutkan bahwa radio kognitif sebagai sebuah radio yang benar-benar cerdas (*smart*) yang memiliki kesadaran diri (*self-aware*), kesadaran RF (*RF-aware*), pengguna peduli (*user-aware*) yang akan mencakup teknologi bahasa dan visi mesin yang mempunyai pengetahuan yang tinggi terhadap lingkungan radio[1]. Menurut Haykins, radio kognitif sebagai sebuah radio yang mempunyai kepedulian akan lingkungan sekelilingnya, belajar dan beradaptasi mengubah parameter operasinya secara *real-time* dengan tujuan menyediakan kapanpun, dimanapun spektral frekuensi yang efisien[2]. Tujuan utama dari radio kognitif ini adalah untuk mendapatkan ketersediaan spektrum kosong terbaik melalui kemampuan kognitif dan rekonfigurasi yang telah dijelaskan sebelumnya[4]. Sejak kebanyakan dari spektrum sudah banyak digunakan, maka tantangan terpenting adalah untuk men-*share* spektrum berlisensi tanpa mengganggu pengguna utamanya seperti diilustrasikan pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Konsep *Spectrum Hole*[2]

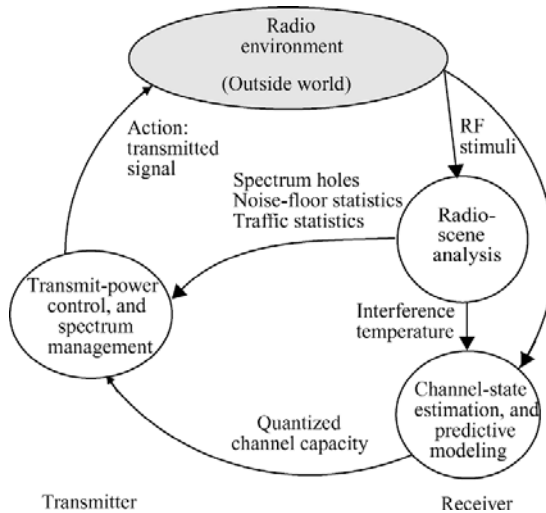
Pada Gambar 2.1 diketahui bahwa radio kognitif memungkinkan penggunaan spektrum yang tidak terpakai secara temporal yang disebut sebagai *spectrum hole* atau *white space*. *Spectrum hole* adalah band frekuensi yang ditugaskan untuk pengguna primer tetapi pada waktu dan lokasi geografis tertentu tidak dimanfaatkan oleh pengguna tersebut.

Dari Gambar 2.2 dapat diketahui operasi radio kognitif yang menunjukkan tiga fundamental tugas kognitif yang dapat dikategorikan sebagai berikut:

- a. *Radio-scene analysis*, yang meliputi:
  - Estimasi dari interferensi suhu pada lingkungan radio;
  - Deteksi dari *spectrum hole*.
- b. *Channel identification*, yang meliputi:
  - Estimasi dari *channel-state information* (CSI);
  - Prediksi dari kapasitas saluran yang digunakan pemancar
- c. Pengaturan daya pancar dan manajemen *dynamic spectrum*.

Proses *sensing* dari lingkungan luar (*outside world*) akan menentukan kehadiran dari *spectrum hole*. Sebelum radio kognitif beroperasi maka perlu dilakukan identifikasi dan pengumpulan informasi yang terdapat pada lingkungan. Pengamatan yang dilakukan oleh *sensing* diproses dalam siklus perencanaan yang digunakan selanjutnya. Hal ini dapat dilakukan oleh radio kognitif dengan kemampuan *cognitive capability*. Kemampuan ini dapat mengindra dan mengumpulkan informasi dari jaringan lingkungannya. Pengamatan yang dilakukan dapat digunakan untuk menganalisis aliran kerja yang dapat mengumpulkan

informasi seperti *bandwidth*, frekuensi, daya, modulasi dan lain-lain. Selanjutnya dengan *reconfigurability* pengguna CR yang telah mengumpulkan informasi yang diperlukan dari lingkungan mereka dapat mengubah parameter transmisi mereka secara dinamik menurut hasil *sensing* dari lingkungan tersebut sehingga dapat mencapai kinerja yang optimal.



**Gambar 2.2** Dasar Lingkaran Kognitif[2]

Dalam kognitif radio ada dua hal penting yang perlu diketahui yakni pertama bagaimana mendeteksi ketersediaan sumber daya dalam penginderaan spektrum untuk mencari *resource mining* dan kedua bagaimana mengalokasikan sumber daya yang tersedia ke pengguna kognitif yang berbeda-beda dalam hal *resource allocation*[3].

Radio kognitif memiliki beberapa fungsionalitas yang dapat melakukan kemampuan dalam kognitif dan rekonfigurasi secara terus menerus yakni sebagai berikut:

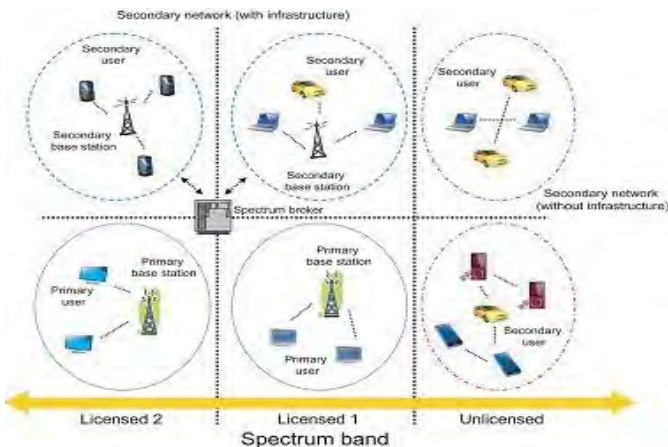
- Spectrum sensing*, yaitu mekanisme untuk mendeteksi kekosongan spektrum agar pemanfaatan frekuensi tidak mengganggu pengguna primer.
- Spectrum management* dan *handoff*, yaitu kemampuan pengguna sekunder untuk memilih band frekuensi terbaik dan melakukan



*hopping* diantara *multiple band* berdasarkan pada karakteristik *time varying channel* untuk memenuhi *Quality of Service (QoS)*.

- c. *Spectrum mobility*, yaitu kemampuan untuk keluar dari saluran yang dipakai ketika pengguna primer terdeteksi. Secara langsung, saat pengguna sekunder mampu mengalihkan transmisinya ke frekuensi lain yang tersedia berdasarkan pada level *noise* dan interferensi, *pathloss*, *channel error rate*, *holding time* dan lain-lain.
- d. *Spectrum allocation* dan *sharing*, kemampuan untuk melakukan koordinasi untuk mengakses saluran yang dipakai dengan pengguna yang lainnya dengan pengguna sekunder lainnya, pengguna primer atau keduanya.

Secara umum arsitektur jaringan radio kognitif dapat dilihat dari gambar 2.3.



**Gambar 2.3** Arsitektur Radio Kognitif[2]

Dari Gambar 3.3 diketahui bahwa jaringan radio kognitif terdiri dari:

- a. *Primary network*, merupakan jaringan yang memiliki lisensi untuk beroperasi pada band spektrum tertentu. Operasi *primary network* tidak boleh terganggu oleh aktivitas *secondary network*.
- b. *Secondary network*, merupakan jaringan yang tidak berlisensi yang beroperasi pada band tertentu yang diinginkan. Sering juga disebut sebagai jaringan *Cognitive Radio (CR)* atau *Dynamic Spectrum Access (DSA)*.

- c. *Broker Spectrum*, jika beberapa *secondary network* mengakses band spektrum yang sama maka penggunaan spektrum mereka dikoordinasikan oleh sebuah sentral jaringan.

Pada radio kognitif ada empat komponen utama yaitu *primary transmitter* (PT), *secondary transmitter* (ST), *primary user* (PU) dan *secondary user* (SU). PT adalah pemancar yang memancarkan sinyal yang akan diterima oleh PU, sinyal yang diterima bisa berasal dari *base transceiver station* (BTS) ataupun dari *access point* (AP). ST adalah pemancar yang memanfaatkan *spectrum holes* agar dapat digunakan oleh user lain. PU adalah user yang mempunyai lisensi agar mendapat layanan dari PT. Sedangkan SU merupakan user yang melakukan *spectrum sensing* yang kemudian memproses spektrum-spektrum yang telah diinderakan agar bisa digunakan kembali oleh user lain melewati ST.

Secara umum arsitektur dari radio kognitif terdiri dari dua tipe yaitu *centralized* dan *distributed*. Pada tipe *centralized* terdapat dua bagian utama yaitu *base station* dan *spectrum broker*. *Base station* berfungsi untuk mengatur transmisi data dari pengguna dan *spectrum broker* berfungsi untuk mengatur alokasi spektrum. Pada tipe ini penginderaan dilakukan oleh *spectrum broker* maupun pengguna sekunder. Untuk tipe *distributed*, penginderaan kedatangan pengguna primer dan pencarian spektrum kosong dilakukan oleh pengguna sekunder sendiri tanpa adanya suatu sistem pusat yang mengatur. Cara yang dilakukan dapat secara kooperatif yaitu bekerjasama dengan pengguna sekunder lain atau non-kooperatif yaitu bekerja dengan sendiri.

Dalam jaringan radio kognitif untuk melakukan *spectrum sensing* maka diperlukan teknik-teknik diantaranya teknik klasik seperti *likelihood ratio test* (LRT), *energy detection* (ED), *matched filter* (MF) *detection*, *cyclostationary detection* (CSD) dan yang baru seperti *eigenvalue based sensing*, *wavelet based sensing*, *covariance based sensing* dan *blindly combined energy detection*[5][6].

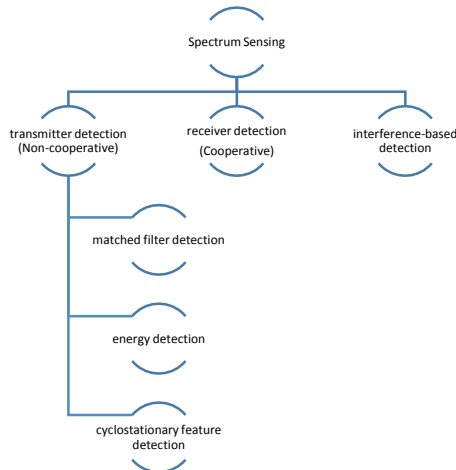
Dalam persyaratan untuk penerapannya bisa dibagi menjadi tiga kategori yaitu metode yang mengharuskan informasi sumber sinyal dan daya derau atau *noise* yaitu *likelihood ratio test*, *cyclostationary detection* dan *matched filter*, metode yang mengharuskan informasi daya derau saja (*semibind detection*) yaitu *energy detection* dan *wavelet based sensing* dan metode yang tidak mengharuskan informasi keduanya (*totally blind detection*) yaitu *eigenvalue-based sensing*, *covariance-based sensing* dan *blindly combined energy detection*.

## 2.2 Spectrum Sensing

*Spectrum sensing* adalah satu dari beberapa fungsi penting dari radio kognitif (CR) untuk mendeteksi *spectrum holes* atau spektrum bebas pada pengguna utama dalam band frekuensinya. Pengguna yang telah terdaftar dan memiliki ijin untuk memanfaatkan spektrum frekuensi dalam sistem radio kognitif disebut sebagai pengguna utama (*primary user/PU*), sedangkan pengguna yang tidak memiliki lisensi spektrum dan akan memanfaatkan spektrum frekuensi pada waktu pengguna utama tidak memanfaatkannya disebut sebagai pengguna sekunder (*secondary user/SU*). Pengguna sekunder dapat memanfaatkan frekuensi kosong pada waktu tertentu saat pengguna utama tidak memanfaatkannya. Agar pemanfaatan frekuensi tersebut tidak mengganggu pengguna utama, maka perlu mekanisme untuk mendeteksi kekosongan spektrum, yang dikenal sebagai *spectrum sensing*. Ketika pengguna primer tidak memanfaatkan band frekuensinya, maka pengguna sekunder dapat memakainya supaya pemanfaatannya meningkat dan efisien. Sensor spektrum dasarnya melakukan uji hipotesa biner apakah ada atau tidak ada sinyal utama dalam saluran tertentu. Saluran bebas dibawah hipotesa 0 dan sibuk dibawah hipotesa 1.

$$\mathcal{H}_0 (\text{idle}) \text{ vs. } \mathcal{H}_1 (\text{busy}) \quad (2.1)$$

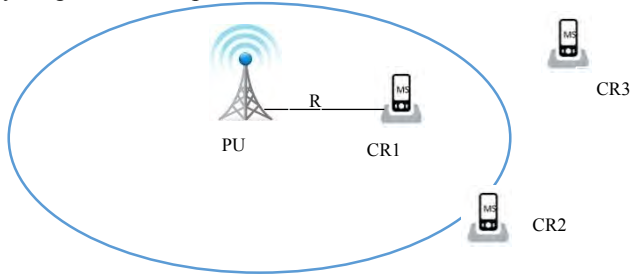
Secara umum *spectrum sensing* dapat diklasifikasikan seperti Gambar 2.4.



**Gambar 2.4** Klasifikasi dari teknik *spectrum sensing*[8]

### 2.2.1 *Spectrum Sensing Terdistribusi*

Pada arsitektur *centralized*, banyak informasi yang harus dilewatkan melalui jaringan dan *central controller* (kontrol pusat) untuk mengkoordinasi spektrum mereka. Hal ini mengakibatkan terjadinya jumlah trafik yang padat. Oleh karena itu *spectrum sensing* terdistribusi lebih unggul dan diutamakan. Pada *spectrum sensing* terdistribusi deteksi band frekuensi yang kosong dari setiap pengguna kognitif radio dapat berbeda-beda tergantung dari tingkat deteksi mereka terhadap kondisi sebenarnya. Hal ini dapat dipengaruhi oleh trafik, jarak, kondisi kanal dan lain sebagainya seperti contoh pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Ilustrasi dari *spectrum sensing* terdistribusi[6]

Dari gambar 2.5 dapat dilihat kognitif radio (CR) bertindak sebagai *secondary user*. Dengan menggunakan metode deteksi kanal, pengguna kognitif radio dapat melakukan *spectrum sensing* dari pengaruh jarak. CR1 diibaratkan dapat mendeteksi keberadaan PU sedangkan CR2 dan CR3 tidak. Maka salah satu cara untuk dapat mengetahui kondisi sebenarnya dari PU adalah dengan mendapatkan informasi dari CR1 yang hasil deteksinya sesuai dengan kondisi sebenarnya. Oleh karena itu hal ini dapat dilakukan jika ketiga CR saling bekerjasama.

### 2.2.2 *Transmitter Detection (Non-cooperative Detection)*

Dari Gambar 2.4 diketahui bahwa teknik yang umum digunakan untuk melakukan penginderaan spektrum (*spectrum sensing*) berdasarkan *transmitter detection* adalah *Energy Detection*, *Matched Filter Detection* dan *Cyclostationery Detection*. Pada *transmitter detection* signal yang diterima oleh *Secondary User* (SU) dimodelkan dalam membuat sebuah keputusan tentang uji hipotesa dalam memilih  $\mathcal{H}_0$  atau  $\mathcal{H}_1$  didasarkan pada sinyal yang diterima[7].

$$\mathcal{H}_0 : r(t) = n(t) \quad \text{Primary User (PU) tidak ada} \quad (2.2)$$

$$\mathcal{H}_1 : r(t) = s(t) + n(t) \quad \text{Primary User (PU) ada} \quad (2.3)$$

Keterangan :

- $s(t)$  adalah sinyal yang dipancarkan oleh *primary transmitter*
- $n(t)$  adalah *noise* AWGN dengan *zero mean and variance* ( $\sigma_s^2$ ) dan *identically and independent distribution* (i.i.d).
- $r(t)$  adalah sinyal yang diterima dari hipotesa yang dilakukan.

Kondisi pertama merupakan keadaan ketika sinyal yang diterima SU hanya berupa *noise* saja yakni  $n(t)$ . Jika kondisi ini terpenuhi maka pada sisi SU tidak ada PU yang terdeteksi. Kondisi kedua merupakan keadaan ketika sinyal yang diterima adalah sinyal yang dipancarkan oleh PU yang telah bercampur dengan *noise* kanal yaitu  $s(t)+n(t)$ . Pemodelan hipotesis ini sama untuk semua model deteksi yang merupakan metode *non-cooperative* pada *spectrum sensing*.

Dalam prakteknya beberapa tantangan untuk *spectrum sensing* adalah diharuskan SNR untuk deteksi serendah mungkin. Pada kanal nirkabel ada *multipath fading* dan *time dispersion* yang dapat mempersulit masalah deteksi. Tantangan lainnya saat level derau/interferensi yang dapat berubah terhadap lokasi dan waktu, dimana daya derau yang tidak menentu adalah masalah untuk deteksi. Tujuan utama dari deteksi yaitu menentukan ada dan tidak adanya pengguna primer pita frekuensi (*band frequency*). Dari setiap metode deteksi yang digunakan untuk menentukan keberadaan pengguna primer dapat ditentukan oleh nilai probabilitas deteksi ( $P_d$ ) dan probabilitas *false alarm* ( $P_{fa}$ ). Probabilitas deteksi adalah probabilitas bahwa detektor memutuskan bahwa saluran tersebut kosong sesuai dengan keadaan sebenarnya. Probabilitas *false alarm* adalah probabilitas yang memutuskan bahwa sinyal utama ada ketika sinyal itu sebenarnya tidak ada. Satu lagi probabilitas yang dikenal dalam metode deteksi adalah probabilitas *missed detection* ( $P_{md}$ ). Probabilitas *missed detection* ini adalah probabilitas bahwa detektor memutuskan bahwa saluran tersebut kosong ketika saluran tersebut diduduki. Jika  $P_{fa}$  tinggi maka tingkat pemanfaatan spektrum akan dikurangi dan pada sisi lain jika  $P_{md}$  tinggi maka gangguan kepada pengguna primer meningkat. Hubungan antara  $P_d$  dan  $P_{fa}$  saling bertolak belakang. Apabila nilai  $P_d$  semakin besar maka nilai  $P_{fa}$  semakin kecil. Untuk mendapatkan nilai  $P_d$  yang besar maka diperlukan jumlah hasil deteksi yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan  $P_{fa}$ . Oleh karena itu, setiap pengguna sekunder perlu saling membagi hasil *sensing* mereka. Perilaku inilah kemudian

dikenal dengan penginderaan kooperatif (*cooperative sensing*). Dalam permasalahan dari *cooperative sensing* berbagi informasi diantara pengguna sekunder adalah sesuatu yang penting. Informasi yang dibagikan diantara pengguna sekunder diatur dalam *decision fusion*. Aturan-aturan yang digunakan untuk membuat keputusan akhir ini adalah aturan “OR” dan aturan “AND”. “1” untuk sinyal yang ada dan “0” untuk sinyal yang tidak ada.

#### 1. Aturan OR

Pada aturan OR ini jika salah satu keputusannya adalah “1” maka keputusan akhir adalah “1”. Pada aturan ini diasumsikan bahwa seluruh keputusan adalah independen sehingga probabilitas deteksi dan probabilitas *false alarm* adalah:

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^J (1 - P_{d,i}) \quad (2.4)$$

$$P_{fa} = 1 - \prod_{i=1}^J (1 - P_{fa,i}) \quad (2.5)$$

#### 2. Aturan AND

Pada aturan AND ini jika dan hanya jika seluruh keputusan adalah “1” maka keputusan akhir adalah “1”. Probabilitas deteksi dan probabilitas *false alarm* adalah:

$$P_d = \prod_{i=1}^J (1 - P_{d,i}) \quad (2.6)$$

$$P_{fa} = \prod_{i=1}^J (1 - P_{fa,i}) \quad (2.7)$$

### 2.3 IEEE 802.16

*Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX) merupakan bagian dari teknologi *Broadband Wireless Access* (BWA), yaitu teknologi yang mampu memberikan layanan data dengan kecepatan tinggi. Sertifikasi yang menunjukkan interoperabilitas peralatan dibangun dengan standar IEEE 802.16. Dalam perkembangannya dikenal dua standar *mainstream interface* yakni standar IEEE 802.16d (*fixed* WiMAX) dan standar IEEE 802.16e (*mobile* WiMAX). WiMAX menyerupai Wi-Fi dalam hal penggunaan teknologi modulasi yang sama. WiMAX juga merupakan teknologi dengan open standar dalam arti komunikasi perangkat WiMAX di antara beberapa vendor yang berbeda tetap dapat dilakukan. Jaringan ini mendukung komunikasi nirkabel yang beroperasi pada batas frekuensi 2 GHz sampai dengan 11 GHz.

OFDM yang digunakan pada standar ini mempunyai 200 *subcarrier*, 192 *subcarrier* digunakan untuk data dan 8 lainnya digunakan untuk pilot. Masing-masing *subcarrier* mempunyai *bandwidth* sebesar 5

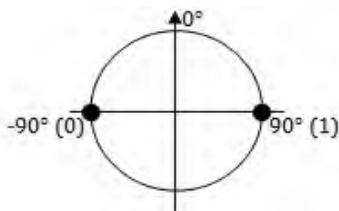
MHz. Modulasi yang digunakan pada masing-masing *subcarrier* bisa menggunakan *Binary Phase Shift Keying* (BPSK), *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK), 16QAM dan 64 QAM. Untuk penggunaan pada frekuensi 3.5 GHz lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut ini.

**Tabel 2.1** Rate Parameter 802.16[12]

<i>Data Rate Mbps</i>	<i>Modulation</i>	<i>Coding Rate</i>	<i>Coded bits per subcarrier</i>	<i>Coded bits per OFDM symbol</i>	<i>Periode symbol (μs)</i>
1.41	BPSK	$\frac{1}{2}$	1	192	68
2.12	BPSK	$\frac{3}{4}$	1	192	68
2.82	QPSK	$\frac{1}{2}$	2	192	68
4.23	QPSK	$\frac{3}{4}$	2	192	68
5.64	16-QAM	$\frac{1}{2}$	4	192	68
8.47	16-QAM	$\frac{3}{4}$	4	192	68
11.29	64-QAM	$\frac{2}{3}$	6	192	68
12.21	64-QAM	$\frac{3}{4}$	6	192	68

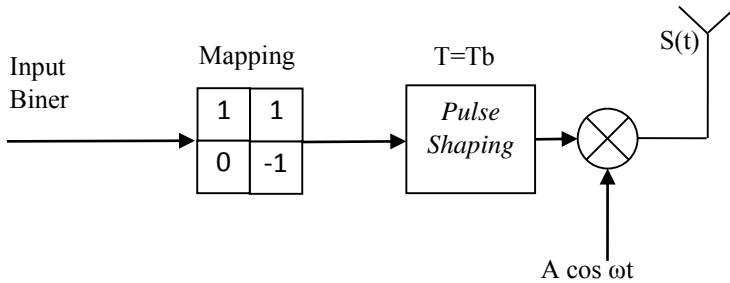
#### 2.4 *Binary Phase Shift Keying* (BPSK)

Salah satu contoh sinyal PSK adalah *Binary* PSK atau lebih dikenal dengan BPSK. Suatu sinyal BPSK memiliki simbol dengan 1 bit per simbolnya. Sinyal BPSK terdiri dari 2 fasa. Setiap fasa akan merepresentasikan satu bit dari sinyal input. Kedua fasa dalam modulasi ini terpisah sejauh  $180^\circ$ . Hal ini dapat dilihat dari Gambar 2.6 berikut ini.



**Gambar 2.6** Titik konstelasi BPSK

BPSK ini merupakan contoh modulasi PSK yang paling sederhana di antara lainnya. Blok diagram modulator BPSK ini dapat dilihat pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.7** Modulator BPSK

Input pada modulator merupakan bilangan biner dengan panjang deretan bit tertentu. S/P pada modulator berfungsi untuk mengubah deretan bit input menjadi pengelompokan jumlah bit per simbol. Pada BPSK jumlah bit dalam satu simbol adalah satu. Jumlah bit dalam satu simbol untuk modulasi PSK lainnya berbeda. Jumlah bit ini tergantung dengan multi level modulasi PSK. PSK yang mempunyai multi level ini disebut dengan M-ary PSK. Untuk BPSK nilai M adalah 2. Untuk menghitung jumlah bit dalam satu simbol untuk multi level modulasi yang berbeda-beda, dapat digunakan persamaan:

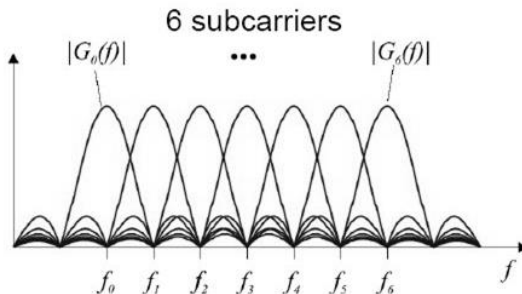
$$\text{Jumlah bit per simbol} = \log_2^{-1} M \quad (2.8)$$

Dimana nilai  $M$  merupakan multi level dari modulasi BPSK. Deretan bit yang melewati *serial to parallel* akan di-*mapping* untuk menentukan titik konstelasi suatu sinyal. Untuk PSK yang mempunyai nilai  $M$  lebih dari 2, hasil mapping merupakan bilangan real dan imajiner yang mempunyai 2 basis yaitu *In-phase* dan *Quadrature*. Hasil *mapping* merupakan sinyal *baseband* BPSK. Untuk membentuk sinyal dalam bentuk pulsa, sinyal *baseband* dibentuk melalui *pulse shaping* untuk mengurangi interferensi antar simbol dan menghemat spektrum frekuensi. *Pulse shaping* yang digunakan mempunyai periode  $T=Tb$  ini hanya berlaku untuk BPSK karena satu simbol mewakili satu bit.



## 2.5 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

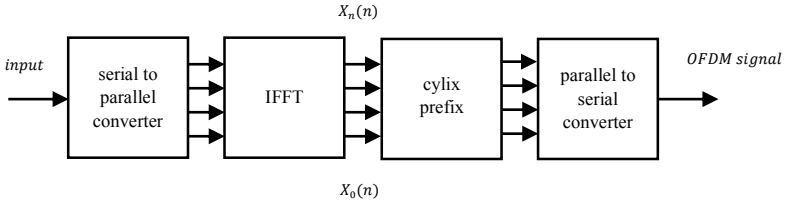
Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) adalah sebuah teknik komunikasi *multicarrier* dimana sinyal yang ditransmisikan menggunakan banyak *subcarrier* yang saling orthogonal satu dengan yang lainnya. Orthogonal dalam hal ini berarti saling tegak lurus yang mengandung makna tidak saling mempengaruhi atau tidak saling menginterferensi. OFDM membagi aliran data *high-rate* menjadi aliran *rate* yang lebih rendah yang kemudian dikirimkan secara bersama pada beberapa *subcarrier*[10]. Masing-masing *subcarrier* dimodulasi dengan menggunakan modulasi konvensional seperti *Phase Shift Keying* (PSK) dan *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM). Orthogonal merupakan suatu kondisi dimana saat suatu *subcarrier* mencapai amplitudo maksimum, *subcarrier* lainnya berada pada keadaan nol. Keorthogonalan antara *subcarrier* dapat dilihat dari 2 cara yaitu dalam domain frekuensi dan domain waktu. Pada domain waktu setiap *subcarrier* harus berupa bilangan integer dari siklus selama tiap interval (durasi) simbol OFDM. Jika dilihat dalam domain frekuensi, spektra amplitudo dari masing-masing *subcarrier* saling *overlapping* seperti terlihat dalam Gambar 2.8.



**Gambar 2.8** OFDM Sub-carrier dalam domain frekuensi

Pada pemancar OFDM, informasi yang dibentuk dalam simbol-simbol dilewatkan melalui konverter *serial to parallel*. Selanjutnya data berupa bit yang telah diparalel ini di-mapping menjadi banyak *subcarrier* menggunakan blok *Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT) dimana setiap *subcarrier* saling orthogonal satu dengan yang lain[10]. Simbol-simbol OFDM ini kemudian ditambahkan dengan sebuah *cyclic prefix* untuk menghapus efek *inter-carrier interference* (ICI) dan selanjutnya dilewatkan melalui sebuah konverter *parallel to serial*. Penggunaan *cyclic*

*prefix* juga ditujukan untuk mengatasi kanal *multipath* sehingga tidak ada informasi yang hilang saat proses transmisi. Untuk proses transmisi lebih lanjut Gambar 2.9 menunjukkan blok diagram dari model OFDM.



**Gambar 2.9** Blok Diagram dari Model OFDM[10]

Sebuah blok data yang terdiri dari bit-bit informasi dapat diwakili sebagai

$$s(n) = [s(n-1), s(n-2), \dots, s(0)] \quad (2.9)$$

Operator IFFT diterapkan pada  $s(n)$  yang mengkonversi sinyal dalam domain frekuensi menjadi sinyal dalam domain waktu[10] dan sinyal dalam domain waktu yang sesuai diberikan oleh

$$x(n) = [x_0(n), x_1(n), x_2(n), \dots, x_{N-1}(n)] \quad (2.10)$$

dimana  $N$  adalah panjang blok IFFT.

Keluaran dari blok IFFT adalah sebuah simbol OFDM. Sebuah *cyclic prefix* dimasukkan sebelum simbol OFDM. Jumlah  $N_{cp}$  dari bit-bit *cyclic prefix* ditambah dan sinyal yang ditransmisikan menjadi:

$$x_{-N_{cp}}(n), \dots, x_{-2}(n), x_{-1}(n), x_0(n), x_1(n), \dots, x_{N-1}(n) \quad (2.11)$$

Dimana tambahan *cyclic prefix* diwakili sebagai

$$x_{cp}(n) = [x_{-N_{cp}}(n), \dots, x_{-2}(n), x_{-1}(n)] \quad (2.12)$$

Sinyal ini ditransmisikan melalui kanal AWGN, sinyal ini dideteksi pada penerima untuk mendeteksi keberadaan dari pengguna utama.

## 2.6 Matched Filter Detection

Salah satu teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi suatu sinyal adalah *matched filter*. Syarat untuk menggunakan *matched filter* ini pada sisi penerima adalah sinyal yang akan difilter haruslah yang

mempunyai informasi yang lengkap mengenai parameter-parameter yang digunakannya. Parameter-parameternya antara lain skema modulasi, frekuensi kerja, daya pancar, filter yang digunakan dan lain sebagainya. Kelebihan menggunakan teknik ini adalah sangat optimal untuk memperbesar nilai SNR jika *noise* yang mempengaruhi adalah *White Gaussian Noise* atau yang lebih dikenal dengan AWGN.



**Gambar 2.10** Blok Diagram untuk *Matched Filter Detection*[7]

Dari Gambar 2.10 sinyal  $s(t)$  adalah sinyal yang dipancarkan oleh pemancar tanpa melalui kanal transmisi. Setelah sinyal ini melalui kanal transmisi dan bercampur dengan *noise* sinyal ini diterima pada sisi penerima. Sinyal  $r(t)$  yang merupakan sinyal terima memiliki keadaan sesuai dengan hipotesis pada Persamaan (2.2) dan Persamaan (2.3). Sinyal ini akan diinputkan ke *matched filter* untuk diproses dan ditentukan keberadaan PU-nya. Konsep *matched filter* ini ekuivalen dengan sinyal  $r(t)$  yang dikonvolusi dengan *template* sinyal yang telah dicerminkan[7].

$$conv = r(t) * s(T - t + \tau) \quad (2.13)$$

Dimana  $T$  merupakan durasi sinyal  $r(t)$  dan  $\tau$  adalah pergeseran *template*. Setelah melakukan konvolusi terhadap *template*, hasil konvolusi harus disampling setiap  $T$  agar keluarannya dapat dibandingkan dengan level *threshold*. Keluaran dari *matched filter* yang telah dibandingkan dengan level *threshold* ( $\lambda$ ) untuk menentukan keberadaan PU dalam spektrum. Berbeda dengan metode deteksi lainnya, *matched filter* membutuhkan informasi yang lengkap mengenai parameter-parameter suatu sinyal yang akan diproses seperti tipe modulasi, orde filter, *pulse shaping*, dan format paket sinyal informasi. Untuk menghitung level *threshold* pada sinyal *matched filter* digunakan rumus probabilitas deteksi dan probabilitas *false alarm*. Penghitungan level *threshold* ini dimaksudkan untuk mendeteksi keberadaan *primary user* pada band dan mendeteksi kekosongan spektrum.

Untuk probabilitas deteksi dan probabilitas *false alarm* ini dapat dirumuskan pada Persamaan (2.14) dan Persamaan (2.15).

$$P_d = Q\left(\frac{\lambda - E}{\sigma\sqrt{E}}\right) \quad (2.14)$$

$$P_{fa} = Q\left(\frac{\lambda}{\sigma\sqrt{E}}\right) \quad (2.15)$$

Dimana  $P_d$  adalah probabilitas deteksi,  $P_{fa}$  adalah probabilitas *false alarm*,  $Q$  adalah distribusi *Q-function*,  $\lambda$  adalah *threshold*,  $E$  adalah energi sinyal dan  $\sigma$  adalah akar dari variansi *noise*.

Untuk menghitung *Q-function* suatu nilai dapat digunakan persamaan:

$$Q(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (2.16)$$

Nilai  $x$  merupakan inputan yang akan dicari nilai *Q-function*-nya, *erf* merupakan fungsi *error function*. Dengan menurunkan Persamaan (2.16), level *threshold* dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\lambda = \sigma\sqrt{E} Q^{-1}(P_{fa}) \quad (2.17)$$

Dimana  $P_{fa}$  adalah probabilitas *false alarm*,  $Q^{-1}$  adalah distribusi *Q function invers*,  $\lambda$  adalah *threshold*,  $E$  adalah energi sinyal dan  $\sigma$  adalah akar dari variansi *noise*.

Untuk menghitung nilai *threshold*, nilai  $P_{fa}$  harus ditentukan terlebih dahulu. Nilai  $P_{fa}$  yang diinputkan dapat diubah-ubah agar dapat dilihat perbedaan dan efeknya pada sistem. Nilai  $E$  dihitung berdasarkan dari sinyal hasil keluaran *matched filter*. Berikut persamaan yang digunakan untuk menghitung energi suatu sinyal diskrit[8].

$$E = \sum_{-\infty}^{\infty} |x[n]|^2 \quad (2.18)$$

Dimana  $x[n]$  merupakan suatu sinyal yang bernilai diskrit.

### 2.6.1 Pulse Shaping

Sebelum sinyal ditransmisikan sinyal informasi akan diubah dulu ke bentuk pulsa-pulsa informasi. Proses pengubahan sinyal inilah disebut dengan *pulse shaping*. Kebutuhan *pulse shaping* dalam dunia telekomunikasi adalah untuk meminimalisasi adanya *Inter Symbol Interference* (ISI) dari sinyal informasi yang dikirimkan. Tidak semua filter bisa digunakan sebagai *pulse shaping* filter karena filter yang digunakan haruslah filter yang tidak menimbulkan ISI. Ada beberapa

filter yang digunakan sebagai *pulse shaping* filter, diantaranya adalah *rectangular filter*, *raise cosine filter* dan *root raise cosine filter*.

### 2.6.2 Raise Cosine Filter

*Raise Cosine Filter* merupakan filter pada transmisi digital yang mempunyai kemampuan untuk meminimalisasi *Inter Symbol Interference* (ISI). *Raise Cosine* merupakan implementasi dari *Low Pass Nyquist Filter*. Dalam domain frekuensi, spektrum akan simetris pada waktu  $\frac{1}{2T}$ , dimana  $T$  merupakan periode simbol dari sistem komunikasi. Persamaan matematis filter ini dalam domain frekuensi dapat dilihat pada persamaan ini.

$$H(f) = \begin{cases} T, & |f| \leq \frac{1-\beta}{2T} \\ \frac{T}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{\pi T}{\beta} \left[ |f| - \frac{1-\beta}{2T} \right] \right) \right], & \frac{1-\beta}{2T} < |f| < \frac{1+\beta}{2T} \\ 0, & \text{---} \end{cases} \quad (2.19)$$

Dimana  $\beta$  = *roll off factor* yang mempunyai nilai berkisar dari 0 sampai dengan 1, dan  $T$  merupakan periode simbol. Impuls respon dari filter ini dapat dituliskan menjadi

$$h(t) = \text{sinc} \left( \frac{t}{T} \right) \frac{\cos \left( \frac{\pi \beta t}{T} \right)}{1 - \frac{4\beta^2 t^2}{T^2}} \quad (2.20)$$

Persamaan di atas dapat diturunkan menjadi persamaan berikut ini.

$$h(t) = \left( \frac{\sin(\pi t/T)}{\pi t/T} \right) \left( \frac{\cos(\beta \pi t/T)}{1 - (2\beta t/T)^2} \right), \quad t = -\infty \text{ sampai } \infty \quad (2.21)$$

### 2.6.3 Matched Filter

*Matched filter* merupakan sebuah filter pada sisi penerima yang bekerja dengan cara mengkorelasikan sinyal yang diterima dengan template sinyal. Ini dapat dicapai dengan cara melakukan konvolusi antara sinyal yang diterima dengan *template* yang sudah dicerminkan terhadap sumbu 0 nya kemudian digeser sepanjang  $T$ . *Template* sinyal merupakan filter yang sama yang digunakan pada sisi pemancar.  $T$  merupakan periode *template* itu sendiri. *Matched filter* ini merupakan filter yang paling optimal yang digunakan untuk memperbesar SNR, tetapi filter ini juga mempunyai kelemahan yaitu filter akan berfungsi

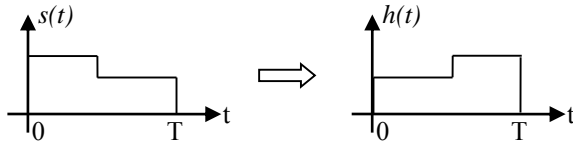
optimal jika kanal yang dilewati adalah *Additive White Gaussian Noise* (AWGN).

Untuk persamaan dari *matched filter* ini dapat dinyatakan sebagai:

$$z(t) = h(t) * r(t) \quad (2.22)$$

Dimana  $z(t)$  adalah sinyal keluaran *matching filter*,  $h(t)$  adalah respon impuls *matched filter*,  $r(t)$  adalah sinyal masukan *matched filter*.

Respon impuls yang digunakan pada *matched filter* adalah filter yang digunakan pada sisi transmitter yang kemudian dicerminkan dan digeser sampai  $T$ . Respon impuls yang digunakan pada *matched filter* tampak pada Gambar 2.11.



**Gambar 2.11** Respon impuls *Matched Filter*

Secara umum blok diagram *matched filter* dapat dilihat pada Gambar 2.12 berikut ini.



**Gambar 2.12** Blok Diagram *Matched Filter*

Dari Gambar 2.12 setelah sinyal  $r(t)$  dikonvolusi dengan respon impuls  $h(t)$ , *output* hasil konvolusi ini adalah  $z(t)$ . Untuk mendapatkan nilai *output* dari *matched filter* ini, sinyal  $z(t)$  harus disampling saat  $t=T$ . Sinyal yang telah disampling  $z(T)$  adalah sinyal *output* dari *matched filter*.

## 2.7 Additive White Gaussian Noise (AWGN)

*Noise* bisa dinyatakan sebagai sinyal elektrik yang muncul secara random dan tidak terprediksi yang berasal dari dalam dan luar. Ketika suatu variabel (nilai) random ditambahkan ke informasi yang dibawa oleh

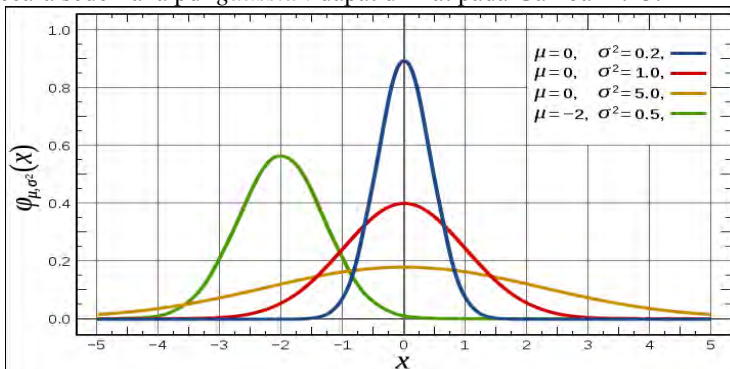
sebuah sinyal, informasi tersebut mungkin sekali akan mengalami perubahan atau suatu kondisi terburuk dapat terjadi dimana informasi tersebut tidak dapat dikenali sesuai bentuk aslinya. *Noise* merupakan hal yang bersifat khusus dan tidak dapat dieliminir sepenuhnya. Pada kanal transmisi *noise* AWGN adalah *noise* yang pasti terjadi dalam jaringan *wireless* manapun yang memiliki sifat-sifat *additive*, *white* dan *Gaussian*. Sifat *additive* artinya *noise* ini dijumlahkan dengan sinyal. Sifat *white* artinya *noise* tidak bergantung pada frekuensi operasi sistem dan memiliki rapat daya konstan dan *Gaussian* artinya besaran tegangan *noise* memiliki rapat peluang terdistribusi *Gaussian*.

Dalam model kanal AWGN, kita selalu berasumsi bahwa tidak ada distorsi atau efek dari sumber lain. AWGN adalah model untuk *thermal noise* yang dihasilkan oleh gerakan elektron acak di penerima.

Dalam teori probabilitas, distribusi *Gaussian* adalah distribusi probabilitas kontinu yang sering digunakan sebagai pendekatan pertama untuk menjelaskan variabel real acak dengan dua parameter yaitu nilai rata-rata/*mean* ( $\mu$ ) dan *variance* ( $\sigma^2$ ). *Mean* menentukan lokasi pusat statistik dan *variance* menentukan lebar dari kurva distribusi tersebut. Proses acak *Gaussian*  $w(t)$  merupakan fungsi acak dengan harga  $w$  pada saat  $t$ , dan dikarakteristikan secara statistik dengan fungsi rapat probabilitas pdf *Gaussian* dinyatakan sebagai:

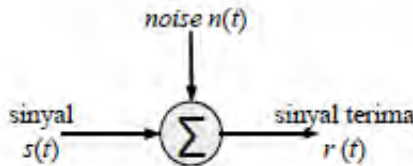
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.23)$$

Dimana  $f(x)$  adalah probabilitas kemunculan derai,  $\sigma$  adalah standar deviasi,  $\mu$  adalah *mean* (nilai rata-rata) dan  $x$  adalah variabel (daya sinyal). Secara sederhana pdf *gaussian* dapat dilihat pada Gambar 2.13.



**Gambar 2.13** PDF *Gaussian*

Proses transmisi melalui kanal AWGN adalah berbentuk gelombang elektromagnetik, dimana sumber memancarkan sinyal  $s(t)$  kemudian saat ditransmisikan akan terkena noise  $n(t)$  dan diterima sebagai sinyal  $r(t)$ . untuk lebih jelasnya dapat dilihat dari Gambar 2.14.



**Gambar 2.14** Model kanal AWGN

## 2.8 Signal to Noise Ratio (SNR)

SNR adalah perbandingan antara sinyal yang dikirim terhadap *noise*. SNR digunakan untuk mengetahui besarnya pengaruh redaman sinyal terhadap sinyal yang ditransmisikan. SNR dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{SNR} = P_r - N_0 \quad (2.24)$$

dengan,

$P_r$  = Daya yang diterima *receiver* (dBm)

SNR = *Signal to Noise ratio* (dB)

$N_0$  = Daya Noise (dBm)

Daya yang diterima *receiver* ( $P_r$ ) dipengaruhi oleh propagasi sinyal dari pemancar ke penerima. Daya terima dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$P_r = P_o + G_t + G_r - PL \quad (2.25)$$

dengan,

$P_r$  = Daya yang diterima *receiver* (dBm)

$P_o$  = Daya yang ditransmisikan (dBm)

$G_t$  = Penguatan pengirim/ *gain transmitter* (dBi)

$G_r$  = Penguatan penerima/ *gain treceiver* (dBi)

PL = Rugi-rugi lintasan (dB)

Perhitungan nilai *pathloss* (PL) berdasarkan kondisi NLOS dan model propagasi ECC 33 untuk kawasan urban dapat ditentukan dengan Persamaan 2.24. ECC 33 adalah salah satu model empiris yang digunakan untuk memprediksikan rugi-rugi lintasan dengan pengukuran prediksi



redaman propagasi pada kawasan urban [8]. Redaman dinyatakan sebagai fungsi dari tinggi efektif antenna BS ( $h_b$ ) dan tinggi antenna pengguna ( $h_{ue}$ ) diukur dari atas tanah. Model propagasi ini dirancang untuk frekuensi hingga 3 GHz, tinggi antenna BS 30-200 m, tinggi antenna UE 1-10 m, dan jarak BS-UE mencapai 20 km.

$$P_L(\text{dB}) = A_{fs}(\text{dB}) + A_{bm}(\text{dB}) - G_b - G_r \quad (2.26)$$

dengan,

$A_{fs}$  = *Free space attenuation*

$$= 92,4 + 20\log(d) + 20\log(f_c)$$

$A_{bm}$  = *Basic medium pathloss*

$$= 20,41 + 9,83\log(d) + 7,9\log(f_c) + 9,56[\log(f_c)]^2$$

$G_b$  = Faktor penguat tinggi antenna *user equipment* (UE)

$$= \log(h_b/200) \{13,958 + 5,8[\log(d)]^2\}$$

$G_r$  = Faktor penguat tinggi antenna eNB

$$= 0,759 h_{ue} - 1,862$$

$d$  = Jarak transmisi UE ke eNB

$f_c$  = Frekuensi kerja (GHz)

Sedangkan untuk nilai daya *noise* ( $N_0$ ), dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.27) :

$$N_0 = 10 \log k \cdot T + 10 \log B + NF \quad (2.27)$$

Dengan :

$N_0$  = daya *noise* saluran transmisi (dBw)

$k$  = konstanta Boltzman ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K)

$T$  = temperatur operasi sistem (K)

$B$  = *bandwidth* (Hz)

$NF$  = *Noise figure* (dB)

Pada jaringan CR, untuk menentukan ketersediaan spektrum maka pengguna CR membutuhkan informasi statistik pada sinyal pengguna primer yang diterima sehingga minimum SNR adalah level sinyal minimum yang dibutuhkan untuk mendeteksi sinyal yang diterima dari pengguna primer tersebut.

## 2.9 Trafik

Secara sederhana trafik dapat diartikan sebagai pemakaian. Pemakaian yang diukur dengan waktu (berapa lama, kapan). Dalam bidang telekomunikasi trafik diartikan sebagai perpindahan informasi dari satu tempat ke tempat lain melalui jaringan telekomunikasi[11]. Nilai trafik dari suatu saluran adalah banyaknya atau lamanya waktu

pendudukan yang diolah oleh berkas saluran tersebut. Besaran dari suatu trafik telekomunikasi diukur dengan satuan waktu. Dua besaran trafik yang sering digunakan untuk analisis antara lain meliputi kedatangan trafik dan intensitas trafik. Salah satu tujuan perhitungan trafik adalah untuk mengetahui *delay* pada suatu jaringan. Saat diketahui *delay* pada jaringan tersebut maka akan diketahui juga kinerja jaringan (*network performance*) sehingga dapat dilakukannya peningkatan mutu pelayanan jaringan telekomunikasi (*quality of service*).

Adapun beberapa besaran trafik diantaranya adalah sebagai berikut:

- a. Volume trafik (V)  
Adalah jumlah (lamanya) waktu pendudukan atau pemakaian saluran.
- b. Intensitas trafik (A)  
Adalah jumlah (lamanya) waktu pendudukan per satuan waktu (waktu pengamatan).
- c. Pendudukan (n)  
Jumlah pemakaian saluran. Satu pendudukan ditentukan oleh awal kedatangan panggilan dan akhir panggilan.
- d. Rata-rata waktu pendudukan atau mean holding time (h)  
Volume trafik dibagi jumlah pendudukan yaitu  $h=V/n$ .

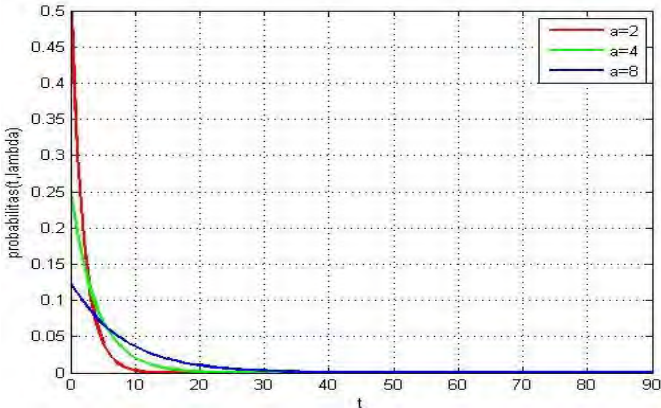
Teori trafik yang akan diimplementasikan dalam perencanaan jaringan, sangat tergantung pada jenis trafik di jaringan tersebut. Oleh karena itu, pada langkah awal biasanya perlu ditetapkan dulu klasifikasi jaringan telekomunikasi yang direncanakan, apakah merupakan jaringan *circuit switch* atau paket. Kemudian dianalisis homogenitas trafiknya apakah termasuk jaringan dengan trafik homogen atau heterogen. Trafik homogen digunakan untuk menjelaskan layanan telekomunikasi klasik berbasis transmisi dan *switching* untuk suara (*voice*). Sedangkan trafik heterogen merupakan jaringan dengan aliran trafik terintegrasi dari sumber-sumber yang berbeda (*voice*, audio, *video*, dan data) menjadi suatu jaringan tunggal.

## 2.10 Distribusi Trafik

Dalam pemodelan trafik terdapat beberapa distribusi trafik yang dapat digunakan yaitu distribusi eksponensial dan distribusi poisson. Keduanya saling berhubungan dan sering digunakan dalam pemodelan trafik dalam telekomunikasi.

### 2.10.1 Distribusi Eksponensial

Distribusi eksponensial adalah kasus khusus distribusi gamma yang memiliki nilai factor bentuk  $a = 1$  dan nilai faktor skala  $b = 1/\lambda$ . Distribusi eksponensial banyak digunakan dalam memodelkan waktu antar kedatangan suatu paket, apabila proses kedatangannya menganut proses poisson.



**Gambar 2.15** Kurva PDF distribusi eksponensial

Gambar 2.15 adalah kurva PDF dari distribusi eksponensial untuk beberapa nilai  $\lambda$ .

Fungsi kepadatan probabilitasnya ditentukan dalam persamaan:

$$f(t) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda t}, & t \geq 0 \\ 0, & \text{yang lain} \end{cases} \quad (2.28)$$

Mean (nilai harapan) dari distribusi eksponensial diperoleh dari:

$$E(x) = \frac{1}{\lambda} \quad (2.29)$$

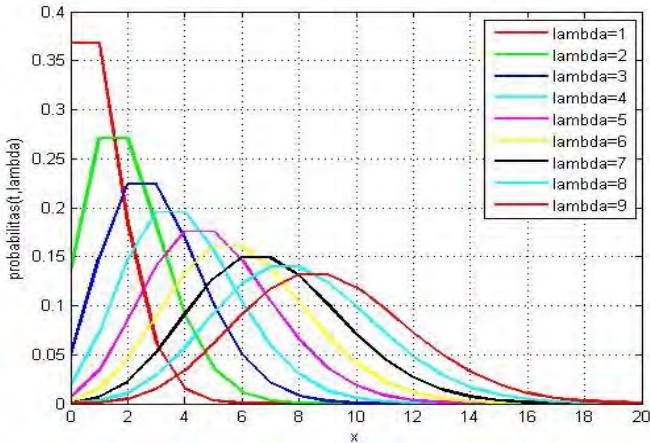
Sedangkan variannya adalah:

$$\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2} \quad (2.30)$$

Distribusi eksponensial mempunyai peran penting baik dalam teori antrian dan masalah kehandalan. Waktu antar kedatangan di fasilitas pelayanan sering dimodelkan dengan distribusi eksponensial.

### 2.10.2 Distribusi Poisson

Distribusi poisson adalah distribusi yang digunakan untuk mengamati jumlah kejadian-kejadian khusus yang terjadi dalam satu satuan waktu. Dalam suatu sistem antrian yang proses kedatangannya mengikuti proses poisson, distribusi poisson memodelkan jumlah kedatangan paket tiap waktu kedatangan.



**Gambar 2.16** Kurva PDF distribusi poisson

Gambar 2.16 adalah gambar distribusi probabilitas poisson untuk beberapa nilai  $\lambda$ .

Fungsi kepadatan probabilitasnya ditentukan dalam persamaan:

$$f_p(x) = \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} \quad (2.31)$$

dimana  $\lambda^x$  adalah rata-rata banyaknya sukses yang terjadi per satuan waktu atau daerah atau volume,  $x = 0, 1, 2, \dots$  dan  $e = 2,71828\dots$

*Mean* (nilai harapan) dari distribusi poisson diperoleh dari:

$$E(x) = \lambda \quad (2.32)$$

Sedangkan variannya adalah:

$$\sigma^2 = \lambda^2 \quad (2.33)$$

### 2.10.3 Hubungan Distribusi Poisson dengan Distribusi Eksponensial

Hubungan antara distribusi eksponensial (eksponensial negatif) dan proses poisson cukup sederhana. Jika jumlah kedatangan mengikuti distribusi poisson maka suatu variabel *random* waktu antar kedatangan mengikuti distribusi eksponensial. Dengan menggunakan distribusi poisson, kita menemukan bahwa probabilitas tidak ada peristiwa yang terjadi dalam rentang hingga waktu  $t$  diberikan sebagai berikut.

$$T_{LC}(x) = \sum_{i=1}^M g_i T_{ED,i} \quad (2.34)$$

### 2.11 Teori Permainan (*Game Theory*)

*Game theory* adalah *mathematical tool* yang digunakan untuk memahami dan memodelkan situasi kompetitif yang mencantumkan interaksi dari pembuat keputusan yang rasional. Dalam perkembangan komunikasi modern bertambah banyaknya jumlah pengguna, aplikasi yang beragam, lingkungan provider yang berbeda-beda hingga sekarang ini membuat kebutuhan akan pengembangan teknologi dan standar yang menyediakan *dynamic automatic network selection* menjadi penting. *Game theory* ini dapat digunakan untuk mempelajari interaksi antara perilaku kooperatif atau kompetitif yang bisa diidentifikasi diantara pengguna dan *service provider* di wilayah tersebut. Komponen utama dalam sebuah *game* adalah pemain, aksi dan *payoff*[13]. Untuk tabel *mapping* komponen dalam *game theory* dapat dilihat dari Tabel 2.2.

**Tabel 2.2** Komponen *Game Theory*

Komponen <i>Game</i>	Keterangan
<i>Player/Pemain</i>	Agen yang bermain boleh <i>user</i> dan/atau <i>network</i>
Strategi	Rencana aksi yang diambil oleh pemain selama permainan berlangsung : ketersediaan/permintaan <i>bandwidth</i> , harga yang ditawarkan, dll
<i>Payoff</i>	Motivasi pemain yang merepresentasikan keuntungan atau estimasi menggunakan fungsi utilitas berdasarkan bermacam-macam parameter: <i>monetary cost</i> , kualitas, beban jaringan,dll
<i>Resources</i>	Resources yang digunakan/dimiliki pemain dalam permainan yang sedang dikompetisikan : <i>bandwidth</i> , daya, dll.

Pendekatan kategori dari setiap interaksi pemain dapat digolongkan dalam dua kategori yaitu pendekatan *cooperative*, dimana kategori ini mengikutsertakan pertimbangan untuk bergabung atau bekerjasama dengan pemain yang lain. Kedua pendekatan *non-cooperative* dimana pada kategori ini setiap pemain memilih strategi secara sendiri-sendiri.

Untuk tabel pendekatan *game theory* dapat dilihat dari Tabel 2.3.

**Tabel 2.3** Kategori Pendekatan *Game Theory*

Interaksi Pemain	Pendekatan <i>game theory</i>	Objektif
<i>user vs user</i>	<i>non-cooperative</i>	<i>User</i> berkompetisi melawan <i>user</i> yang lain dan berusaha memaksimalkan utilitasnya sendiri
	<i>cooperative</i>	<i>User</i> bekerja sama untuk mendapatkan keuntungan (memaksimalkan kesejahteraan bersama)
<i>network vs user</i>	<i>non-cooperative</i>	<i>User</i> berkompetisi dengan jaringan, masing-masing berusaha meningkatkan utilitasnya sendiri. Di satu pihak <i>user</i> berusaha untuk memaksimalkan manfaat keuntungan mereka. Disisi lain, jaringan bertujuan untuk memaksimalkan keuntungan bagi penyedia jasa layanan
	<i>cooperative</i>	Kedua sisi bekerja sama untuk mencapai kepuasan bersama
<i>network vs network</i>	<i>non-cooperative</i>	<i>Network</i> saling berkompetisi untuk memaksimalkan pendapatan pribadi mereka
	<i>cooperative</i>	<i>Network</i> bekerja sama untuk mencapai kesejahteraan bersama yang maksimum

Fungsi utilitas menjadi tantangan yang berpengaruh terhadap bagaimana pemain akan memilih aksi mereka. Fungsi utilitas

menjelaskan persepsi pemain terhadap performansi dan kepuasan. Semua pendekatan yang ada memiliki tujuan untuk optimasi jaringan dengan memaksimalkan nilai utilitas. Pada trafik heterogen, sejumlah aplikasi yang berbeda dengan persyaratan yang berbeda membuat definisi fungsi utilitas menjadi kompleks. Untuk tipe layanan yang berbeda-beda maka fungsi utilitas didefinisikan untuk menjelaskan kepuasan pelanggan dengan parameter QoS tertentu.

### 2.11.1 Nash Equilibrium

*Game theory* dilakukan untuk mencari sebuah titik keseimbangan (*Nash Equilibrium*) dari setiap interaksi yang dilakukan. Terdapat dua jenis N.E yakni *pure strategy nash equilibrium* dimana dalam hal ini setiap pemain memilih strategi dengan pasti dan yang lainnya dikenal dengan *mixed strategy nash equilibrium* dimana para pemain dianggap memainkan setiap strategi dengan probabilitas sendiri-sendiri. Setiap pemain mencari maksimalisasinya sendiri-sendiri. Hal ini dapat diartikan bahwa setiap pemain mencari strategi optimal yang ada. Strategi optimal adalah kondisi dimana dalam rangkaian kegiatan permainan, pemain berada dalam posisi yang saling menguntungkan tanpa menghiraukan kondisi pesaingnya. Misalkan kita anggap  $a \in$  profil strategi  $A$ ,  $a_i \in A_i$  aksi pemain ke- $i$ , dan  $a_{-i}$  menunjukkan aksi dari pemain yang lainnya. Maka sebuah *nash equilibrium* dari sebuah strategi permainan  $\Gamma$  adalah sebuah profil  $a^* \in A$  untuk setiap pemain  $i \in N$ :

$$u_i(a_i^*, a_{-i}^*) \geq u_i(a_i, a_{-i}^*) \quad \forall a_i \in A_i \dots\dots\dots (2.35)$$

Sebuah *nash equilibrium* adalah sebuah aksi profil dimana tidak ada pemain yang melakukan penyimpangan yang sepihak [14]. Untuk mencari sebuah *nash equilibrium* untuk setiap pemain  $i$ , maka dapat dicari respon terbaik  $a_i$  pada bentuk dari  $a_{-i}$ . Untuk mencari sebuah *point* dimana tidak ada yang melakukan penyimpangan dimana sebuah profil strategi dimana setiap aksi pemain adalah sebuah respon terbaik. Pada tabel dengan dua pemain (dapat dibangkitkan), ditulis dalam huruf tebal respon terbaik dari satu pemain untuk setiap pilihan dari lawannya, sebuah *nash equilibrium* adalah sebuah profil dimana kedua aksi dalam huruf tebal. Sebagai contoh dapat dilihat dari Tabel 2.4. Dari Tabel 2.4 dapat diketahui permainan ini memiliki satu titik *nash equilibrium* yaitu saat kedua pemain melakukan aksi  $(C_1, F_2)$ .

**Tabel 2.4** Mencari Sebuah *Nash Equilibrium*

	$C_1$	$C_2$
$F_1$	$b_{11} \text{ } c_{11}$	<b><math>b_{12}</math></b> $c_{12}$
$F_2$	<b><math>b_{21}</math></b> $c_{21}$	$b_{22}$ $c_{22}$



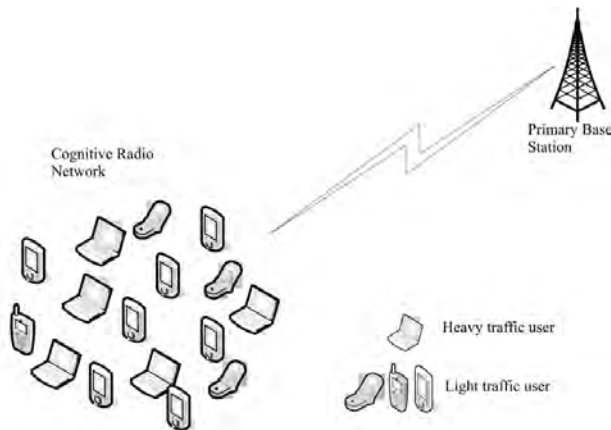
*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

### BAB III

## PEMODELAN DAN SIMULASI SISTEM

Kita mempertimbangan penginderaan dari satu kanal dengan  $M$  sub-kanal dari sistem primer. Dalam lokasi jaringan terdapat  $K$  pengguna sekunder yang lokasinya tergolong jauh dari *base station* primer yang dapat dilihat dari Gambar 3.1. Dalam skenario ini SNR yang diterima pengguna sekunder dari *base station* primer diasumsikan sangat kecil. Dalam hubungannya dengan trafik heterogen permasalahan muncul saat bagaimana perilaku pengguna sekunder dalam mengakses spektrum primer dari model sistem yang sudah dibuat sebelumnya. Untuk memodelkan *spectrum sensing* ini dapat menggunakan *non-cooperative game*. Jumlah pemain dari *game* ini adalah jumlah pengguna sekunder  $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_M\}$ . Strategi dari setiap pemain adalah untuk memilih dari *binary strategy set* untuk melakukan *sensing* atau tidak melakukan *sensing* pada awal setiap interval waktu *sensing*. Dengan membuat notasi *game theory*, *binary strategy set* dari pengguna  $i$  dapat dilihat dari persamaan 3.1. *Payoff* dari setiap pengguna adalah perbedaan manfaat dari penggunaan spektrum dan harga yang terkait.

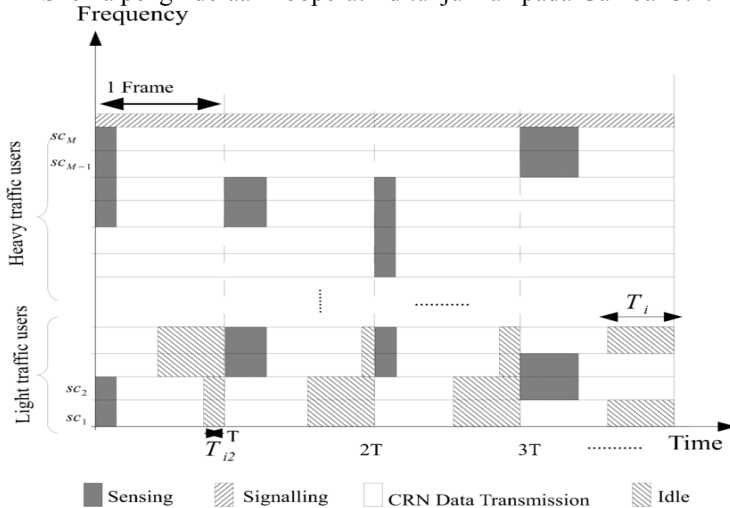
$$S_i = \{\text{sense}, \text{not sense}\} \quad (3.1)$$



**Gambar 3.1** Skenario dan Model Sistem[13]

Dari Gambar 3.1 jaringan terdiri dari  $K_1$  sebagai banyaknya pengguna *heavy traffic* dan  $K_2$  sebagai banyaknya pengguna *light traffic* dimana setiap pengguna bersifat mementingkan diri sendiri. Pengguna sekunder yang memutuskan untuk melakukan *sensing* tidak dapat melakukan transmisi data selagi melakukan *sensing*. Sementara para pengguna sekunder lainnya yang memutuskan untuk tidak melakukan *sensing*, dapat menguping/mendengar hasil dari *sensing* yang dilakukan pengguna lain dan dengan demikian dapat memiliki keuntungan yang lebih besar dalam hal transmisi data mereka sendiri. Namun, jika tidak ada pengguna yang berpartisipasi dalam *sensing* berharap orang lain akan berpartisipasi, maka tidak ada pengguna akan mencapai hasil apapun. Dengan demikian, pengguna dasarnya non-kooperatif, namun kerjasama dapat muncul di antara para pengguna sekunder karena tidak ada dari mereka yang menginginkan *payoff* dengan nilai sangat kecil hingga mendekati nol. Untuk skenario semacam ini, maka penting untuk mempelajari dinamika perilaku pengguna sekunder sehingga kerjasama dapat dilakukan untuk menjaga ketersediaan pengguna *spectrum sensing*, sementara memenuhi tingkat yang diperlukan dalam hal kinerja deteksi. Pengguna sekunder berkembang dari waktu ke waktu, belajar dari perilaku pengguna lain dan populasi dari pengguna yang sama mengambil strategi yang sama.

Skema penginderaan kooperatif ditunjukkan pada Gambar 3.2.

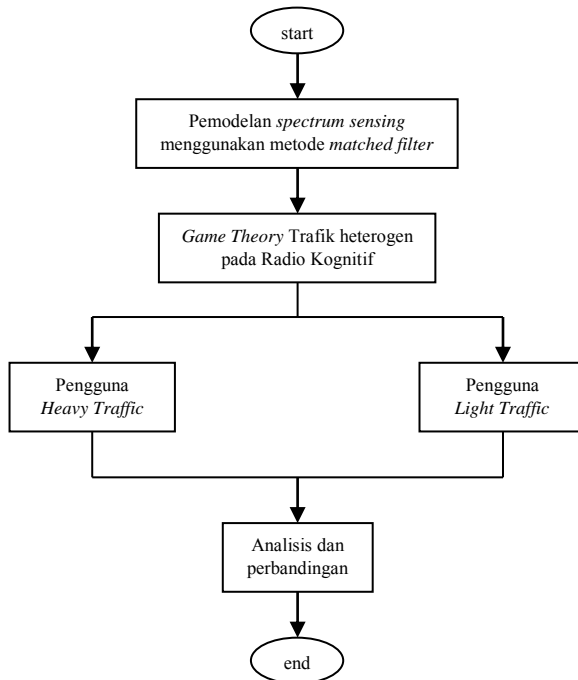


**Gambar 3.2** Skema Cooperative Spectrum Sensing[13]

Dari Gambar 3.2 durasi setiap *frame* adalah  $T$  dan durasi penginderaan untuk setiap frame adalah  $T_s$ .  $T_i > 0$  dan  $0 \leq T_{i2} < T_i$  adalah durasi waktu bebas dari satu pengguna sekunder dengan trafik biasa untuk melakukan *sensing* atau tidak, secara masing-masing.

### 3.1 Metode Perencanaan Sistem

Perencanaan dilakukan berdasarkan berbagai macam literatur dan konsep teori yang terkait. Perencanaan dilakukan dengan menerapkan mekanisme deteksi *spectrum sensing* menggunakan teknik *matched filter* untuk melakukan *sensing* dan dengan menggunakan aturan “OR” pada pengambilan keputusan untuk menggabungkan hasil *sensing* dari setiap pengguna sekunder. *Signaling channel* digunakan untuk berbagi hasil *sensing*. Jika saluran tersebut ternyata kosong, maka setiap pengguna diberikan satu *sub-channel* untuk mengirimkan datanya. Secara umum tahap perancangan sistem dapat dilihat dari Gambar 3.3.



**Gambar 3.3** Blok Diagram Perancangan Sistem

### 3.2 Parameter Sistem

Dalam pemodelan simulasi tugas akhir ini digunakan beberapa asumsi dan parameter yaitu:

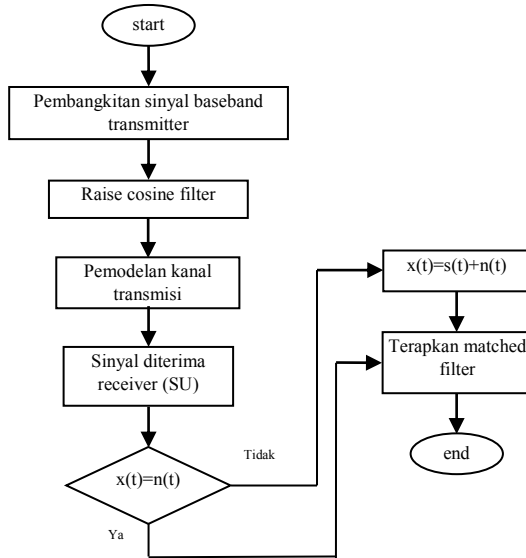
1. *Primary transmitter* menggunakan modulasi *Orthogonal Frequency Division Multiplex* (OFDM).
2. Modulasi yang digunakan pada tiap-tiap *subcarrier* adalah BPSK.
3. Panjang IFFT yang digunakan pada modulasi OFDM adalah 256.
4. Pulse shaping menggunakan *Raised Cosine Filter*.
5. Kanal transmisi yang digunakan adalah *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) dimana *noise* AWGN dengan *mean* nol varian dan *identically and independent distribution* (i.i.d).
6. Model propagasi yang digunakan pada jaringan *mobile wimax* adalah model propagasi ECC 33.
7. Metode sensing yang digunakan adalah *matched filter detection*.
8. Setiap pengguna sekunder melakukan *spectrum sensing* terdistribusi dalam arti melakukannya sendiri-sendiri.
9. Jumlah pengguna sekunder dibatasi hanya sampai 4 pengguna *heavy traffic* dan 4 pengguna *light traffic*.
10. Pembangkitan trafik pengguna *heavy traffic* menggunakan proses random menggunakan distribusi eksponensial negatif dengan kecepatan data 1.41 Mbps.
11. Pembangkitan trafik pengguna *light traffic* menggunakan proses random menggunakan distribusi eksponensial dengan rata-rata waktu antar kedatangan 10 menit, rata-rata durasi panggilan 10 menit dan rata-rata jumlah panggilan sebanyak 4 kali.
12. *Game Theory* yang digunakan adalah *non-cooperative game theory*.
13. Fungsi utilitas dan informasi dari pengguna *heavy traffic* dan pengguna *light traffic* sudah ditentukan.
14. Dalam *cooperative sensing*, dengan asumsi pengguna sekunder yang lokasinya tergolong jauh dari *base station* primer maka target  $P_d$  yang diinginkan sebesar 0.95.

### 3.3 Spectrum sensing menggunakan Matched Filter

Dalam perencanaan ini, sistem secara keseluruhan dibagi menjadi 2 blok diagram yaitu blok diagram *Primary Transmitter* (PT) dan blok diagram *Secondary User* (SU). Blok PT merupakan pemancar radio kognitif primer dengan sistem OFDM yang digunakan pada jaringan radio wimax dengan spesifikasi yang sesuai dengan standar IEEE

802.16. Untuk blok SU merupakan pengguna sekunder yang melakukan penginderaan spektrum menggunakan metode deteksi *matched filter*.

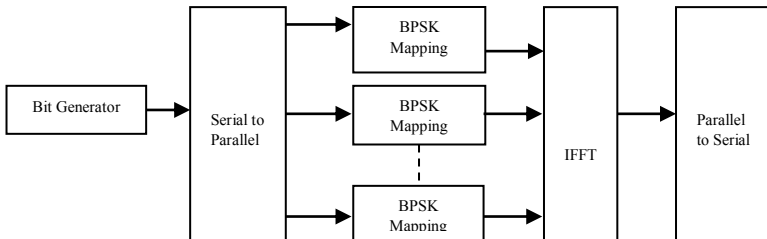
Diagram alir untuk membuat metode deteksi *matched filter* ini dapat dilihat dari gambar 3.4.



**Gambar 3.4** Diagram Alir *Spectrum Sensing* Menggunakan *Matched Filter*

### 3.3.1 Pemancar OFDM (*primary transmitter*)

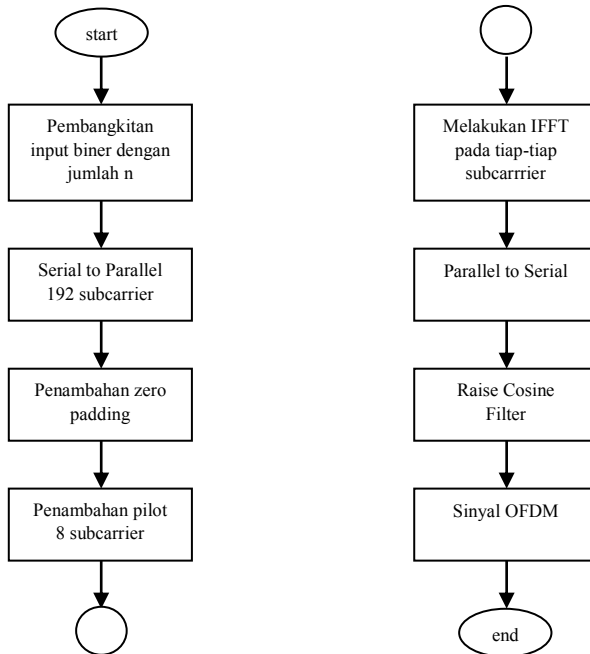
Blok diagram untuk pemancar OFDM ini dapat dilihat pada Gambar 3.5.



**Gambar 3.5** Blok Diagram Pemancar OFDM

Dari gambar 3.5 perancangan pemancar OFDM ini dilakukan berdasarkan standar IEEE 802.16 yaitu jaringan wimax. Sistem ini menggunakan 200 *subcarrier*, modulasi yang digunakan pada masing-masing *subcarrier* adalah *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) dan panjang IFFT yang digunakan adalah 256.

Untuk memudahkan pembuatan transmitter ini maka dapat dibuat diagram alir dari pemancar OFDM seperti gambar 3.6.

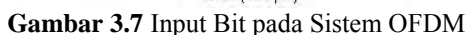


**Gambar 3.6** Diagram Alir Pembuatan *Transmitter*

### 3.3.2 Bit Generator

Bit generator merupakan input dari *transmitter* yang berupa bilangan biner dengan jumlah sebesar  $n$  bit dengan pembangkitan bilangan secara acak dengan probabilitas 0.5 untuk masing-masing bit 0 dan 1. Jumlah bit ini dapat diubah-ubah sesuai dengan jumlah bit yang diinginkan. Disini bit yang dibangkitkan adalah sebanyak 1000 bit. Deretan bit-bit ini nantinya akan diproses dan dimodulasi menggunakan modulasi BPSK per-*subcarrier*-nya. Untuk membuat plot suatu sinyal

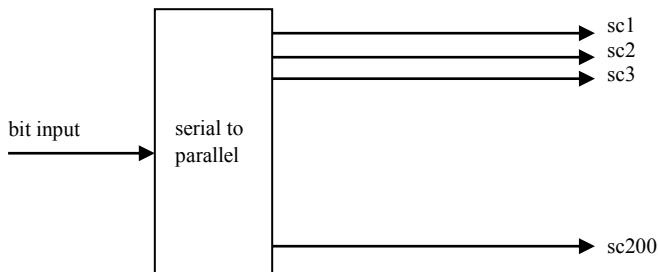
Dari Gambar 3.7 dengan membangkitkan 100 bit saja, penampakan gambar bisa lebih jelas dilihat sehingga terlihat perbedaan kondisi ketika bit bernilai 0 dan bit bernilai 1.



*Serial to Parallel* atau S/P merupakan blok yang berfungsi untuk membagi *input* yang berupa *bit stream* dengan nilai matrik 1 x jumlah bit menjadi beberapa sub blok dengan jumlah *subcarrier* yang diinginkan, *subcarrier* yang digunakan pada sistem adalah sebanyak 200 buah. Dari 200 *subcarrier* yang digunakan 192 *sub carrier* digunakan untuk data dan 8 *subcarrier* lainnya digunakan untuk pilot sebagai sinkronisasi.

41

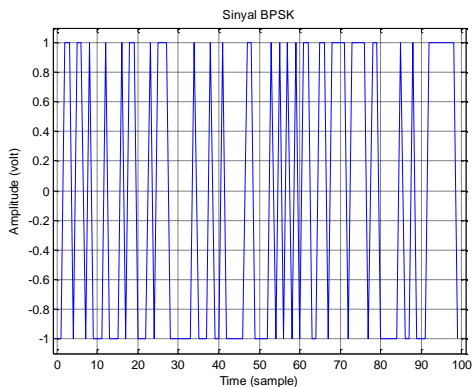




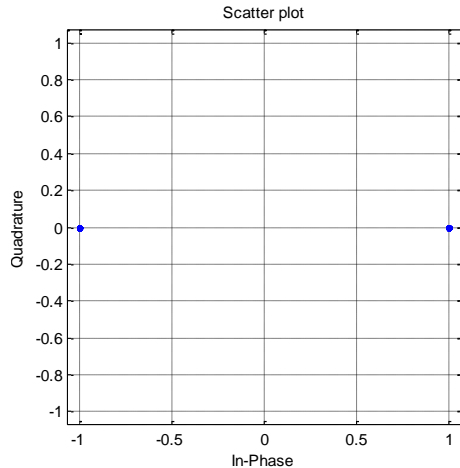
**Gambar 3.8** Blok Diagram *Serial to Parallel*

### 3.3.4 Modulasi *Binary Phase Shift Keying (BPSK)*

Modulasi yang digunakan pada sistem ini adalah BPSK dimana 1 simbol BPSK terdiri dari 1 bit data yang direpresentasikan dengan nilai 1 dan -1. Dari nilai yang diinputkan bentuk *mapping* BPSK-nya dapat dilihat pada Gambar 3.9. Untuk penampakan titik konstelasi dari hasil *mapping* BPSK ini dapat dilihat pada Gambar 3.10. Pada gambar terbukti bahwa adanya perubahan fasa sebesar  $180^\circ$  antara satu simbol dengan simbol lainnya. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya data input berupa bilangan biner yang terdiri dari bit 1 dan bit 0, ketika diubah menjadi simbol BPSK data yang bernilai biner 1 akan diubah menjadi simbol 1 dan data yang bernilai biner 0 diubah menjadi simbol -1. Hasil inilah yang nantinya akan diproses selanjutnya.



**Gambar 3.9** Sinyal BPSK



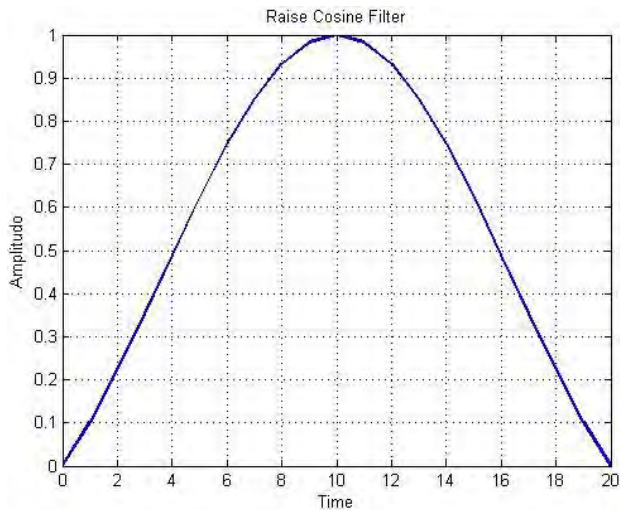
**Gambar 3.10** Titik konstelasi BPSK

### 3.3.5 *Invers Fast Fourier Transform*

Proses IFFT dan FFT merupakan kunci utama dalam OFDM. IFFT berfungsi sebagai pembuatan simbol (modulator) OFDM dan untuk membuat frekuensi *carrier* agar saling orthogonal satu dengan yang lainnya. Panjang IFFT defaultnya adalah  $2^n$  dimana nilai  $n$  adalah bilangan bulat positif. Dari standar IEEE 802.16 panjang IFFT yang digunakan pada OFDM ini adalah sebesar 256.

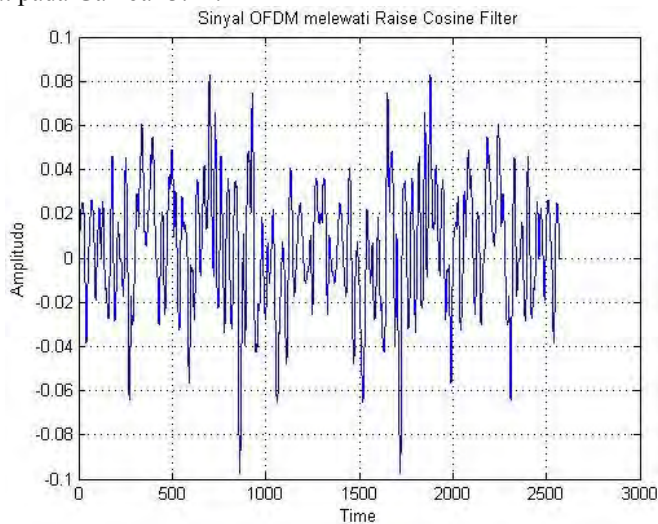
### 3.3.6 *Raise Cosine Filter*

Sebelum sinyal hasil OFDM ditransmisikan kanal melalui kanal, sinyal informasi dilewatkan pada filter *raise cosine* untuk melakukan pembentukan pulsa, respon impuls dari filter ini merupakan sebagai inputan nantinya pada *matched filter* yang berada pada sisi *secondary user* (SU). Parameter yang mempengaruhi respon impuls *raise cosine* ini adalah  $\alpha$ ,  $\alpha$  merupakan faktor *roll off* dari *raise cosine* yang bernilai dari rentang 0 sampai 1. Nilai *roll off* yang diinputkan adalah 0,5. Bentuk respon impuls dari *raise cosine* filter ini dapat dilihat pada Gambar 3.11.



**Gambar 3.11** Respon Impuls *Raise Cosine Filter*

Parameter yang diinputkan pada sistem memenuhi persamaan 2.22. Sinyal hasil pemfilteran menggunakan *raised cosine* ini dapat dilihat pada Gambar 3.12.



**Gambar 3.12** Sinyal OFDM

### 3.3.7 Receiver Secondary User (SU)

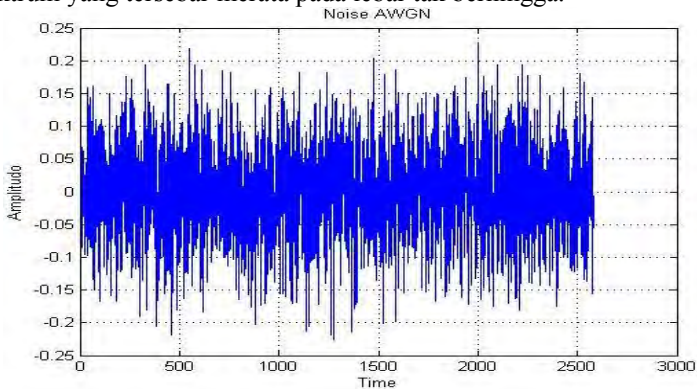
Dari Gambar 3.13 sinyal yang dipancarkan oleh *primary user* (PU) adalah sinyal OFDM yang menggunakan modulasi BPSK pada masing-masing *sub carrier*-nya. Sebelum sinyal PU diterima pada blok *matched filter*, sinyal tersebut terlebih dahulu melalui kanal transmisi. Kanal yang digunakan adalah *Additive White Gaussian Noise* (AWGN).



**Gambar 3.13** Blok Diagram Receiver Secondary User

### 3.3.8 Kanal AWGN

*Additive White Gaussian Noise* (AWGN) merupakan suatu proses stokastik yang terjadi pada kanal dengan karakteristik rapat daya *spectral noise* merata di sepanjang *range* (*white*) frekuensi. Oleh karena itu kanal ini mempunyai karakteristik respon frekuensi yang sama disepanjang frekuensi dan variannya sama dengan satu. Pada kanal transmisi selalu terdapat penambahan derau yang timbul karena akumulasi derau termal dari perangkat pemancar, kanal transmisi, dan perangkat penerima. Derau yang menyertai sinyal pada sisi penerima dapat didekati dengan model statistik. Derau AWGN merupakan gangguan yang bersifat *Additive*/penjumlahan terhadap sinyal transmisi, dimodelkan dalam pola distribusi acak *gaussian* dengan *mean* ( $m$ )=0, standar deviasi ( $\sigma$ ) =1,  $PSD=No/2$  (W/Hz), dan mempunyai rapat spektrum yang tersebar merata pada lebar tak berhingga.

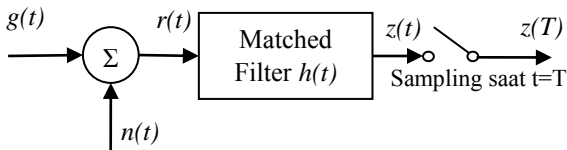


**Gambar 3.14** Sinyal OFDM Melewati Kanal AWGN

Gambar 3.14 merupakan gambar sinyal OFDM yang telah bercampur dengan *noise*. SNR yang diinputkan pada sistem sebesar 20dB.

### 3.3.9 Matched Filter

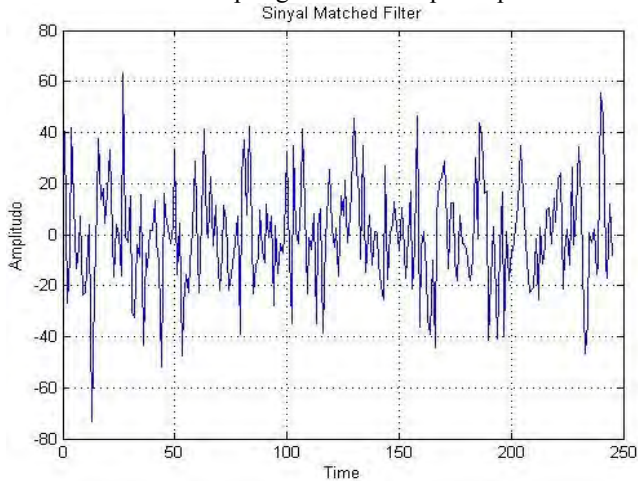
Sinyal yang diterima untuk diinputkan pada *matched filter* merupakan sinyal yang dipancarkan *Primary Transmitter* (PT) melewati kanal AWGN. Sinyal yang telah diterima ini akan di-*matched filter* kemudian keluaran dari filter ini akan dibandingkan dengan *threshold* untuk mendeteksi keberadaan *Primary User* (PU) dan spektrum yang kosong (*spectrum holes*) agar dapat dipergunakan kembali. Keluaran dari *matched filter* ini merupakan hasil konvolusi dari sinyal yang diterima dengan *template* dari sinyal itu sendiri. Maksud *template* disini adalah respon impuls yang digunakan saat melakukan *filtering* pada sisi *transmitter*. Disini respon impuls yang digunakan pada sisi *transmitter* adalah *raise cosine*. Blok diagram *matched filter* tampak seperti Gambar 3.15.



**Gambar 3.15** Blok Diagram *matched filter*

Sinyal yang diterima pada *matched filter* ini adalah sinyal  $r(t)$ . Sinyal  $r(t)$  ini adalah sinyal pada Gambar 3.14, sinyal ini akan konvolusikan dengan respon impulse *raise cosine* filter. Respon impuls *raise cosine* ini sama pada Gambar 3.11. Prinsip kerja dari *matched filter* ini adalah mengkonvolusikan sinyal yang diterima dengan respon impuls yang digunakan pada filter *raise cosine* pada sisi *primary Transmitter* (PT). Respon impuls yang dibangkitkan disini mempunyai frekuensi sampling sebesar 10 Hz dan frekuensi sampling sinyal input adalah sebesar 4Hz. Disini keluaran *matched filter* adalah sinyal  $z(t)$  yang kemudian disampling saat  $t=T$  sehingga keluaran dari filter ini adalah sinyal  $z(T)$ . Penyamplingan dilakukan saat  $t=T$  ini karena pada saat ini kondisi sinyal saat konvolusi adalah *matched*. Respon impuls

*matched filter* yang digunakan sama dengan Gambar 3.11. Sinyal yang telah dikonvolusi dan disampling saat  $t=T$  tampak seperti Gambar 3.16

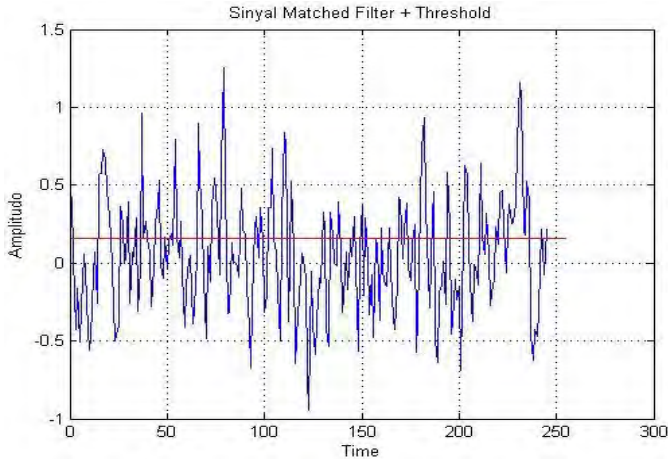


**Gambar 3.16** Sinyal Keluaran dari *Matched Filter*

Gambar 3.16 didasarkan dari persamaan 2.22 dimana  $h(t)$  adalah respon impuls dari filter dan  $r(t)$  adalah sinyal yang diterima sebagai input *matched filter*.

### 3.3.10 Ambang Batas Deteksi (*Detection Threshold*)

*Threshold* merupakan nilai ambang dimana akan digunakan untuk memberikan batas pada sinyal hasil dari *matched filter*. Sinyal yang telah di-*threshold* terbagi menjadi 2 zona. Zona yang berada diatas *threshold* mengindikasikan keberadaan PU pada spektrum, sedangkan zona yang berada dibawah *threshold* merupakan spektrum kosong yang dapat digunakan oleh *secondary user*. Untuk menentukan *threshold* nilai  $P_{fa}$  harus ditentukan terlebih dahulu. Masing-masing teknik pada *spectrum sensing* mempunyai persamaan yang berbeda pula. Disini teknik yang digunakan adalah *Matched filter detection*. Nilai  $P_{fa}$  ditentukan sebesar 0.001. Saat nilai  $P_{fa}$  ini diinputkan pada sistem, hasil plotnya dapat dilihat pada Gambar 3.17.



**Gambar 3.17** Level *Threshold* pada Sinyal *Matched Filter*

Dari Gambar 3.17 penentuan *threshold* ini berdasarkan persamaan probabilitas deteksi ( $P_d$ ) dan probabilitas *false alarm* ( $P_{fa}$ ) pada metode deteksi *matched filter*. Persamaan ini memenuhi Persamaan (2.14) dan Persamaan (2.15). Karena nilai  $P_{fa}$  sudah ditentukan sebelumnya level *threshold* dapat dicari menggunakan Persamaan (2.17) setelah energi sinyal diketahui dari Persamaan (2.18). Persamaan (2.17) inilah yang akan digunakan untuk menentukan *threshold* pada sistem. Setelah ditemukan level *threshold* dari persamaan di atas, level *threshold* tersebut akan dibandingkan dengan sinyal *output matched filter* sehingga dapat ditentukan keberadaan spektrum yang dapat digunakan oleh pengguna lainnya.

### 3.4 Pembangkitan *Secondary User*

Seperti dilihat dari Gambar 3.1 bahwa dalam lokasi jaringan terdapat  $K$  pengguna sekunder yang lokasinya tergolong jauh dari *base station* primer dan skenario ini SNR yang diterima dari pengguna sekunder dari *base station* primer diasumsikan sangat kecil. Maka dalam menentukan perubahan SNR sangat berpengaruh terhadap jarak. Dengan menggunakan model propagasi ECC 33 untuk jaringan wimax dapat diketahui *pathloss* untuk dapat dicari SNR dan perubahan jarak sesuai SNR yang diinginkan. Untuk menentukan SNR dari perubahan jarak

digunakan Tabel 3.1 sebagai acuan menggunakan formula dari model propagasi yang digunakan.

**Tabel 3.1** Spesifikasi Perangkat Transceiver 802.16e

PARAMETER	NILAI	SATUAN
$P_{t,max}$	43	dBm
$P_{r,sensitivity}$	-100,7	dBm
Noise Figure	7	dB
Gain Antenna Transmitter ( $G_t$ )	15	dB
Gain Antenna Receiver ( $G_r$ )	-1	dB
Tinggi Antena Pemancar ( $H_{tx}$ )	36	Meter (m)
Tinggi Antena Penerima ( $H_{rx}$ )	1,5	Meter (m)
Bandwidth Sistem	5	MHz

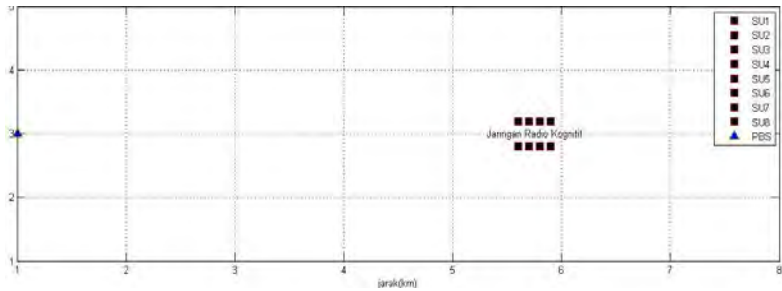
Dari simulasi dapat diketahui jarak dan SNR dari jumlah *secondary user* yang dibangkitkan dengan  $K = 8$  terhadap *base station*. Hasil simulasi dapat dilihat dari Tabel 3.2.

**Tabel 3.2** Jarak dan SNR dari *secondary user* terhadap *primary base station*

Jenis Trafik	<i>Secondary user</i>	Jarak(km)	SNR(dB)
<i>Heavy</i>	SU1	5.8848	-14.0001
	SU2	5.8948	-14.2743
	SU3	5.9048	-14.3015
	SU4	5.9148	-14.3287
<i>Light</i>	SU5	5.8848	-14.0001
	SU6	5.8948	-14.2743
	SU7	5.9048	-14.3015
	SU8	5.9148	-14.3287

Setelah mengetahui jarak dari berbagai SNR yang dibangkitkan maka secara sederhana dapat dibuat skema posisi setiap *secondary user* pada matlab seperti pada Gambar 3.18. Pengguna *heavy traffic* dan *light traffic* dalam jaringan radio kognitif saling berdekatan satu sama lain melakukan *sensing* dengan *base station* primer dengan kondisi tergolong jauh. SNR yang digunakan untuk mendeteksi berkisar -14 dB.

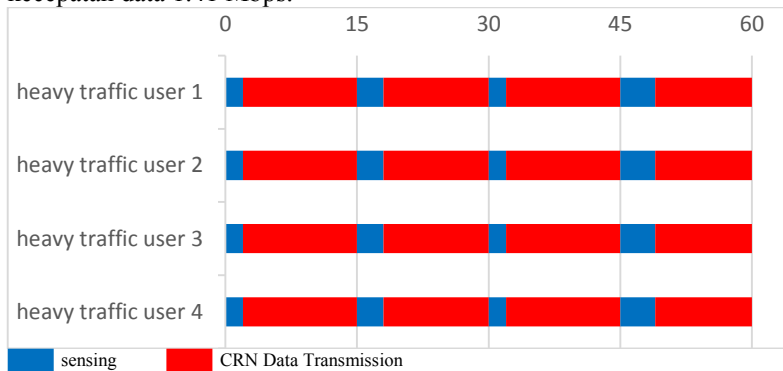




**Gambar 3.18** Lokasi *Secondary User* terhadap *Primary Base Station*

### 3.5 Kondisi Trafik *Secondary User*

Dalam hubungannya dengan trafik heterogen, perlu diketahui bahwa untuk membangkitkan skema *cooperative spectrum sensing* perlu dibangkitkan kondisi dari pengguna sekunder dalam perannya sebagai pengguna *heavy traffic* dan *light traffic*. Model tradisional untuk trafik data sebagai *heavy traffic* dapat dimodelkan dengan distribusi eksponensial negatif. Dari Tabel 2.1 percobaan dapat dilakukan dengan membangkitkan trafik data dari setiap pengguna sekunder dengan kecepatan data 1.41 Mbps.



**Gambar 3.19** Skema *Spectrum Sensing* pada *Heavy Traffic*

Dari Gambar 3.19 diketahui bahwa pada trafik data tidak ada waktu *idle*. Pengamatan dilakukan selama 60 menit dengan waktu *sensing* setiap frame sama.

Untuk trafik *voice* sebagai *light traffic* dapat dimodelkan dengan memperhatikan beberapa hal seperti jumlah *call* dalam selang waktu  $T$  yang dapat dimodelkan dengan distribusi poisson, waktu antar kedatangan dimodelkan dengan distribusi eksponensial, dan durasi *call* dimodelkan dengan distribusi eksponensial negatif. Dari 4 pengguna sekunder yang dibangkitkan dapat dilihat skema waktu untuk *data transmission* dan waktu untuk *idle* sebagai berikut:

a.  $R = \text{poissrnd}(a, m, n)$

Pembangkitan bilangan acak distribusi poisson dengan rata-rata  $a$  sebanyak  $m \times n$ . Dari keempat pengguna *light traffic*, dibangkitkan jumlah *call* dengan rata-rata 4 panggilan per jam.

$r_1 = \text{poissrnd}(4, 1, 1)$

$r_2 = \text{poissrnd}(4, 1, 1)$

$r_3 = \text{poissrnd}(4, 1, 1)$

$r_4 = \text{poissrnd}(4, 1, 1)$

b.  $R = \text{exprnd}(\mu_1, m, n)$

Dari jumlah *call* selanjutnya dapat dicari rata-rata waktu antar kedatangan  $\mu_1$ . Dari ketiga pengguna sekunder, rata-rata waktu kedatangan 10 menit.

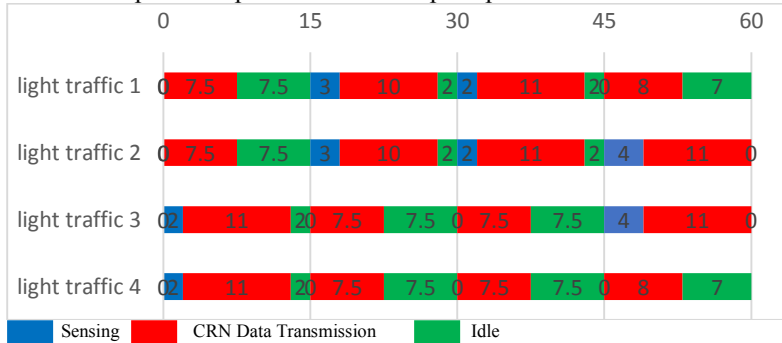
$R = \text{exprnd}(10, 4, 1)$

c.  $R = \text{exprnd}(\mu_2, m, n)$

Dari rata-rata waktu antar kedatangan selanjutnya dapat dicari rata-rata durasi *call*  $\mu_2$ . Dari ketiga pengguna sekunder, durasi *call* adalah 10 menit.

$R = \text{exprnd}(10, 4, 1)$

Dari ketiga hal tersebut maka *light traffic* dari setiap pengguna sekunder dapat ditampilkan dari data seperti pada Gambar 3.20.



**Gambar 3.20** Skema *Spectrum Sensing* pada *Light Traffic*

Dari Gambar 3.20 dapat dicari *volume* trafik, waktu pendudukan rata-rata dan intensitas trafik.

*volume* trafik yaitu jumlah total waktu pendudukan dalam arti jumlah total CRN *data transmission* semua saluran yaitu:

$$V = \sum_{i=1}^4 CRN \text{ data transmission}$$

$$V = \sum_{i=1}^4 CRN \text{ data transmission} = lt_1 + lt_2 + lt_3 + lt_4$$

$$V = (7.5+10+11+8) + (7.5+10+11+11) + (11+7.5+7.5+11) + (11+7.5+7.5+8)$$

$$V = 36.5+39.5+37+35+34 = 182 \text{ menit} = 3.033 \text{ Erlang jam}$$

$$\text{Waktu pendudukan rata-rata} = h = \frac{V}{n} = \frac{182 \text{ menit}}{16 \text{ pendudukan}} = 11.375 \text{ menit}$$

$$\text{Intensitas trafik} = A = \frac{V}{T} = \frac{\text{volume trafik}}{\text{periode pengamatan}} = \frac{182 \text{ menit}}{60 \text{ menit}} = 3.033 \text{ Erlang}$$

### 3.6 Non-cooperative Game untuk Cooperative Sensing

*Throughput* dari setiap pengguna *sensing* ketika pengguna primer tidak ada dan ketika tidak ada alarm palsu yang dibangkitkan ( $R_{H0}(T_s)$ ) adalah

$$R_{H0}(T_s) = \frac{T - T_s}{T} (1 - P_{FA}) C_{H0} \quad (3.2)$$

Dimana  $C_{H0}$  adalah *data rate* dari pengguna sekunder dibawah  $H_0$ . Ketika pengguna primer ada tetapi deteksinya hilang, maka *throughput* dari setiap pengguna *sensing* ( $R_{H1}(T_s)$ ) adalah

$$R_{H1}(T_s) = \frac{T - T_s}{T} P_{MD} C_{H1} \quad (3.3)$$

Dimana  $C_{H1}$  adalah *data rate* dari pengguna sekunder ditawarkan dibawah  $H_1$ .

Jika diasumsikan bahwa  $p_{H0}$  adalah probabilitas bahwa pengguna primer tidak ada. Maka total *throughput* dari pengguna sekunder ( $R(T_s)$ ) adalah

$$R(T_s) = \rho_{H0} R_{H0}(T_s) + (1 - \rho_{H0}) R_{H1}(T_s) \quad (3.4)$$

Jika diasumsikan bahwa  $\rho_{H0} \approx 1$  dan  $C_{H1} \ll C_{H0}$ . Oleh karena itu, *throughput* yang terjangkau dapat dikira-kira sebagai berikut:

$$R(T_s) \approx \rho_{H0} R_{H0}(T_s) \quad (3.5)$$

Misalkan  $S_{cs} = \{S_1, S_2, \dots, S_J\}$  diatur pada pengguna sekunder yang berpartisipasi pada *cooperative sensing*, dimana  $J$  adalah jumlah pengguna yang melakukan *sensing*, yakni pengguna *heavy traffic* dan pengguna *light traffic*.  $K_1$  adalah jumlah pengguna *heavy traffic* dan  $K_2$  adalah jumlah pengguna *light traffic*.

#### a. Pengguna Heavy Traffic

Untuk pengguna trafik padat, jika memutuskan untuk menjadi pengguna *sensing* terhadap  $K_1 - 1$  pengguna trafik padat lainnya, maka rata-rata *payoff*-nya dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$U_{ht,s}(J) = U_o \left(1 - \frac{\tau}{J}\right) - \frac{\sigma\tau}{J} - e_{txt}(1 - \frac{\tau}{J}) \quad J \in [1, K_1 + K_2] \quad (3.6)$$

dimana  $\tau = \frac{T_s}{T}$ ,  $U_o = \rho_{Ho}(1 - \hat{P}_{FA})C_{Ho}$ ,  $\hat{P}_{FA} = (1 - \prod_{i=1}^I P_{FA}, i)$ ,

$i$  adalah indeks pengguna diantara semua pengguna *sensing*.  $\sigma$  adalah energi yang dikonsumsi per unit dari waktu yang diperlukan untuk melakukan *sensing*.  $e_{txt}$  menunjukkan konsumsi energi per unit dari waktu yang diperlukan untuk mentransmisikan data. Diasumsikan bahwa durasi *sensing* untuk pengguna *heavy traffic* dan *light traffic* yang berkontribusi pada *cooperative sensing* adalah sama.

Jika memutuskan untuk tidak melakukan *sensing*, maka rata-rata *payoff*-nya menjadi:

$$U_{ht,ns}(J) = \begin{cases} U_o - e_{txt} & \text{if } J \in [1, K_1 + K_2 - 1] \\ 0 & \text{if } J = 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Jika *payoff* yang diterima sebagai pengguna *sensing* tanpa melakukan *cooperative sensing* lebih besar daripada *payoff* saat pengguna *sensing* berkontribusi dalam *cooperative sensing*, maka setiap pengguna sekunder akan cenderung menjadi *free rider*[13]. Sebaliknya, jika *payoff* menjadi pengguna *sensing* dalam *cooperative sensing* lebih besar, maka semua pengguna sekunder akan melakukan strategi ini oleh karena itu tidak ada yang menjadi *free rider*. Jadi, sebagai ganti strategi murni ini, kita mempertimbangkan  $p_1$  sebagai probabilitas dari satu pengguna *heavy traffic* melakukan *sensing* dan  $p_2$  sebagai probabilitas dari satu pengguna *light traffic* melakukan *sensing*. Maka, utilitas rata-rata saat melakukan “sense” sebagai pengguna *heavy traffic* adalah:

$$\bar{U}_{ht,s} = \sum_{j_2=0}^{K_2} \sum_{j_1=0}^{K_1-1} \binom{K_2}{j_2} p_2^{j_2} (1 - p_2)^{(K_2-j_2)} \binom{K_1-1}{j_1}$$

$$p_1^{j_1}(1-p_1)^{(K_1-1-j_1)}U_{ht,s}(j_1+j_2+1) \quad (3.8)$$

dimana,  $0 < p_1, p_2 < 1$  untuk  $0 < \tau < 1$ .

utilitas rata-rata saat melakukan “non sense” sebagai pengguna *heavy traffic* adalah:

$$\bar{U}_{ht,ns} = \sum_{j_2=0}^{K_2} \sum_{j_1=0}^{K_1-1} \binom{K_2}{j_2} p_2^{j_2} (1-p_2)^{(K_2-j_2)} \binom{K_1-1}{j_1} p_1^{j_1} (1-p_1)^{(K_1-1-j_1)} U_{ht,ns}(j_1+j_2) \quad (3.9)$$

### b. Pengguna *Light Traffic*

Jika memutuskan untuk menjadi pengguna *sensing* terhadap  $K_2 - 1$  pengguna trafik biasa lainnya, maka rata-rata *payoff*-nya dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$U_{lt,s}(J) = \begin{cases} U_o(1-\tau_i) - \frac{\sigma\tau}{J} - e_{txt}(1-\tau_i) & \text{if } J \in [1, K_1 + K_2] \text{ dan } \frac{\tau}{J} \leq \tau_i \\ U_o\left(1 - \frac{\tau}{J}\right) - \frac{\sigma\tau}{J} - e_{txt}\left(1 - \frac{\tau}{J}\right) & \text{if } J \in [1, K_1 + K_2] \text{ dan } \tau_i < \frac{\tau}{J} < 1 \end{cases} \quad (3.10)$$

dimana  $\tau_i = \frac{T_i}{T}$ . Jika memutuskan untuk tidak melakukan *sensing*, maka *payoff*-nya menjadi:

$$U_{lt,ns}(J) = \begin{cases} U_o(1-\tau_i) - e_{txt}(1-\tau_i) & \text{if } J \in [1, K_1 + K_2 - 1] \\ 0 & \text{if } J = 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

Utilitas rata-rata saat melakukan “sense” sebagai pengguna *light traffic* adalah:

$$\bar{U}_{lt,s} = \sum_{j_2=0}^{K_2-1} \sum_{j_1=0}^{K_1} \binom{K_2-1}{j_2} p_2^{j_2} (1-p_2)^{(K_2-1-j_2)} \binom{K_1}{j_1} p_1^{j_1} (1-p_1)^{(K_1-j_1)} U_{lt,s}(j_1+j_2+1) \quad (3.12)$$

dan utilitas rata-rata saat melakukan “non sense” sebagai pengguna *light traffic* adalah:

$$\bar{U}_{lt,ns} = \sum_{j_2=0}^{K_2-1} \sum_{j_1=0}^{K_1} \binom{K_2-1}{j_2} p_2^{j_2} (1-p_2)^{(K_2-1-j_2)} \binom{K_1}{j_1} p_1^{j_1} (1-p_1)^{(K_1-j_1)} U_{lt,ns}(j_1+j_2) \quad (3.13)$$

Untuk mendapatkan nilai  $P_d$  yang besar memerlukan jumlah hasil deteksi yang jauh tinggi dibandingkan  $P_{fa}$ . Oleh karena itu, perlu setiap pengguna sekunder saling membagi hasil penginderaan mereka. Perilaku inilah kemudian dikenal dengan *cooperative sensing*.

Dari kondisi 8 pengguna sekunder yakni 4 pengguna *heavy traffic* dan 4 pengguna *light traffic*. Dengan aturan "OR" yang digunakan untuk menggabungkan hasil *sensing* dari setiap pengguna sekunder dalam kelompok *sensing*,  $P_{md}$  meningkat sebanding dengan jumlah pengguna sekunder. Akan tetapi *tradeoff*-nya adalah  $P_{fa}$  sehingga dengan penginderaan secara kooperatif dapat mengurangi  $P_{fa}$  dari target  $P_d$  yang diinginkan. Selanjutnya dengan kondisi trafik dan SNR yang berbeda-beda dari setiap pengguna sekunder maka dapat dicari nilai  $P_{fa}$  dengan parameter  $\bar{P}_d = 0.95$ . Asumsikan  $s(n)$  adalah AWGN noise dengan *mean* 0 and *variance* 1 dan N adalah jumlah *sample* yang diambil adalah 1000, maka dapat dicari  $P_{fa}$  dengan persamaan

$$P_{fa} = Q(Q^{-1}(\bar{P}_d)(1 + snr) + \sqrt{N}snr) \quad (3.14)$$

**Tabel 3.3**  $P_{fa}$  Secondary User Terhadap Primary Base Station

Pengguna sekunder	Kondisi Trafik	Jarak (km)	SNR (dB)	$P_{fa}$
SU1	<i>heavy</i>	5.8848	-14.0001	0.6742
SU2	<i>heavy</i>	5.8948	-14.2743	0.7000
SU3	<i>heavy</i>	5.9048	-14.3015	0.7024
SU4	<i>heavy</i>	5.9148	-14.3287	0.7049
SU5	<i>light</i>	5.8848	-14.0001	0.6742
SU6	<i>light</i>	5.8948	-14.2743	0.7000
SU7	<i>light</i>	5.9048	-14.3015	0.7024
SU8	<i>light</i>	5.9148	-14.3287	0.7049

Dari Tabel 3.3 nilai  $P_{fa}$  tergantung pada jumlah N yang diambil selama periode *sensing*. Semakin besar nilai N maka  $P_{fa}$  yang diperoleh akan semakin kecil begitu juga sebaliknya. Dengan aturan "OR", jika ingin ikut berpartisipasi dalam *cooperative sensing* maka  $P_{fa}$  yang diperoleh berdasarkan jumlah pengguna *heavy traffic* ( $K_1$ ) dan jumlah pengguna *light traffic* ( $K_2$ ) dapat dilihat dari Tabel 3.4. dari Tabel 3.4 dengan aturan "OR" diperoleh hasil diasumsikan seluruh keputusannya adalah independen sehingga probabilitas *false alarm* menggunakan persamaan 2.5 berdasarkan masing-masing jenis pengguna trafik. Karena kondisi pengguna tergolong jauh dari *base station* primer sehingga semakin banyak jumlah pengguna sekunder maka nilai  $P_{fa}$  yang diperoleh semakin besar.

**Tabel 3.4**  $P_{fa}$  Secondary User Terhadap Primary Base Station dengan Aturan “OR”

$K_1$	$K_2$	Pengguna Sekunder		$P_{fa}$
		Heavy Traffic	Light Traffic	
1	1	SU1	SU5	0.8939
2	2	SU1,SU2	SU5,SU6	0.9904
3	3	SU1,SU2,SU3	SU5,SU6,SU7	0.9992
4	4	SU1,SU2,SU3,SU4	SU5,SU6,SU7,SU8	0.9999

Dalam permainan non-kooperatif ini ada beberapa parameter yang ditetapkan yaitu  $C_{H_0} = 1.41$  Mbps,  $\tau = 0.5$ ,  $\tau_i = 0.47$ ,  $\sigma = 0.4$ ,  $e_{txt} = 0.2$ . Diset  $S_{cs} = \{s_1, s_2, \dots, s_J\}$ , dengan  $J = 8$ .  $J$  adalah penomoran dari pengguna yang melakukan *sensing*, termasuk didalamnya *heavy raffic users* dan *light traffic users*.

**a. Heavy Traffic Users**

Dari Tabel 3.5 dapat dilihat untuk satu pengguna *heavy traffic*, jika memutuskan menjadi pengguna *sensing* terhadap 3 pengguna *heavy traffic* lainnya maka rata-rata *payoff*-nya dapat dicari menggunakan Persamaan (3.6) sedangkan jika memutuskan tidak menjadi pengguna *sensing* terhadap 3 pengguna *heavy traffic* lainnya maka rata-rata *payoff*-nya dapat dicari menggunakan Persamaan (3.7).

**Tabel 3.5** *Payoff Heavy Traffic User Melakukan Sensing dan Tidak Melakukan Sensing*

J	$U_{ht,s}(J)$	$U_{ht,ns}(J)$	J	$U_{ht,s}(J)$	$U_{ht,ns}(J)$
1	69.4950	139.39	5	125.4110	139.39
2	104.4425	139.39	6	127.7408	139.39
3	116.0917	139.39	7	129.4050	139.39
4	121.9162	139.39	8	130.6531	139.39

**b. Light Traffic Users**

Dari Tabel 3.6 dapat dilihat untuk satu pengguna *light traffic*, jika memutuskan menjadi pengguna *sensing* terhadap 3 pengguna *light traffic* lainnya maka rata-rata *payoff*-nya dapat dicari dari Persamaan (3.10), jika memutuskan tidak menjadi pengguna *sensing* terhadap 3 pengguna *light traffic* lainnya maka rata-rata *payoff*-nya dapat dicari dari Persamaan (3.11).

**Tabel 3.6** *Payoff Light Traffic User* Melakukan *Sensing* dan Tidak Melakukan *Sensing*

J	$U_{lt,s}(J)$	$U_{lt,ns}(J)$	J	$U_{lt,s}(J)$	$U_{lt,ns}(J)$
1	69.4950	74.3367	5	74.2967	74.3367
2	74.2367	74.3367	6	74.3034	74.3367
3	74.2700	74.3367	7	74.3081	74.3367
4	74.2867	74.3367	8	74.3117	74.3367

Dalam teori permainan optimisasi dilakukan secara terdistribusi dimana setiap pemain membuat keputusan mereka sendiri-sendiri. Sebagai perkiraan “lebih mudah” dibandingkan menyelesaikan permasalahan *NP-hard*. Hal yang penting adalah mencari sebuah *stable point* (*nash equilibrium*) dari interaksi yang dilakukan. Langkah-langkah untuk melakukan *pure strategy* dalam mencari *nash equilibrium* dalam permainan ini adalah sebagai berikut:

1. Terjemahkan setiap kasus ke dalam bentuk matriks segi, dimana satu pemain berperan sebagai pemain baris dan yang lain berperan sebagai pemain kolom.
2. *Pay off* terbesar berarti keuntungan bagi pemain baris.
3. *Pay off* terbesar berarti keuntungan bagi pemain kolom.
4. Tentukan nilai minimum setiap baris.
5. Tentukan nilai maksimum dari langkah ke-4
6. Tentukan nilai maksimum setiap kolom.
7. Tentukan nilai minimum dari langkah ke-6.

Jadi disamping *pure strategies* ini, dapat dipertimbangkan  $p_1$  sebagai probabilitas dari satu pengguna *heavy traffic* melakukan *sensing* dan  $p_2$  sebagai probabilitas dari satu pengguna *light traffic* melakukan *sensing*. Dari Tabel 3.7 dapat dilihat utilitas rata-rata saat melakukan “sense” sebagai pengguna *heavy traffic* dapat dicari menggunakan Persamaan (3.8) sedangkan utilitas rata-rata saat tidak melakukan “sense” sebagai pengguna *heavy traffic* dapat dicari dari Persamaan (3.9).

**Tabel 3.7** Utilitas rata-rata *Heavy Traffic User* Melakukan *Sensing* dan Tidak Melakukan *Sensing*

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$
0.9	0.1	379.3715	406.4612	0.4	0.6	14.8025	15.8595
0.8	0.2	236.8398	253.7517	0.3	0.7	4.6836	5.0180



$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$	$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.7	0.3	138.8311	148.7446	0.2	0.8	0.9251	0.9912
0.6	0.4	74.9376	80.2886	0.1	0.9	0.0578	0.0620
0.5	0.5	36.1389	38.7195	-	-	-	-

Dari Tabel 3.8 utilitas rata-rata saat melakukan “sense” sebagai pengguna *light traffic* dapat dicari dengan menggunakan Persamaan (3.12), sedangkan untuk utilitas rata-rata saat tidak melakukan “sense” sebagai pengguna *light traffic* dapat dicari dengan menggunakan Persamaan (3.13).

**Tabel 3.8** Utilitas rata-rata *Light Traffic User* Melakukan Sensing

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$	$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	306.3296	273.9730	0.4	0.6	22.4327	20.0876
0.8	0.2	208.0083	186.0762	0.3	0.7	9.0874	8.1399
0.7	0.3	134.5682	120.4067	0.2	0.8	2.5811	2.3127
0.6	0.4	81.7319	73.1484	0.1	0.9	0.3087	0.2767
0.5	0.5	45.5561	40.7824	-	-	-	-

### 3.7 Penambahan Jumlah $K_1$ dan $K_2$

Pengamatan dilakukan dengan kondisi biaya energi untuk melakukan transmisi data ( $e_{txt}$ ) dan biaya energi untuk melakukan *sensing* ( $\sigma$ ) tetap. Dengan  $e_{txt} = 0.2$  dan  $\sigma = 0.4$  tetap untuk jumlah  $K_1$  dan  $K_2$  berbeda-beda maka dapat dicari rata-rata utilitasnya seperti dapat dilihat dari Tabel 3.9 hingga Tabel 3.12.

a.  $K_1=1$  dan  $K_2=1$

**Tabel 3.9** Utilitas rata-rata dengan  $K_1=1$  dan  $K_2=1$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	166617	177720	209808	141516
0.8	0.2	148104	157973.33	197464	131642.67
0.7	0.3	129591	138226.667	182654	121769.33
0.6	0.4	111078	118480	167844	111896
0.5	0.5	92565	98733.33	153034	102022.67
0.4	0.6	74052	78986.67	138224	92149.33

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.3	0.7	55539	59240	123414	82276
0.2	0.8	37026	39493.33	108604	72402.67
0.1	0.9	18513	19746.67	93794	62529.33

b.  $K_1=2$  dan  $K_2=2$

**Tabel 3.10** Utilitas rata-rata dengan  $K_1=2$  dan  $K_2=2$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	24082.75	26049.6	23517.5	18974.4
0.8	0.2	19028.25	20582.4	19832.5	16008
0.7	0.3	14568.25	15758.4	16415.25	13256.8
0.6	0.4	10703.25	11577.6	13266	10720
0.5	0.5	7432.9	8040	10385.25	8397.6
0.4	0.6	4757.05	5145.6	7772.05	6288.96
0.3	0.7	2675.85	2894.4	5427	4395.12
0.2	0.8	1189.25	1286.4	3349.975	2715.68
0.1	0.9	297.315	321.6	1540.975	1250.64

c.  $K_1=3$  dan  $K_2=3$

**Tabel 3.11** Utilitas rata-rata saat dengan  $K_1=3$  dan  $K_2=3$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	2590.8	2790.6	2245.6	1937.8286
0.8	0.2	1819.6167	1959.9429	1702.8333	1469.9143
0.7	0.3	1219.0022	1312.9714	1249.0333	1078.5429
0.6	0.4	767.6496	826.8480	877.4587	757.9194
0.5	0.5	444.2417	478.5	581.4338	502.4079
0.4	0.6	227.4517	244.9920	354.2536	306.2290
0.3	0.7	95.9562	103.3560	189.2192	163.6408
0.2	0.8	28.4315	30.6240	79.6314	68.9013
0.1	0.9	3.5539	3.8280	18.7914	16.2683

d.  $K_1=4$  dan  $K_2=4$

**Tabel 3.12** Utilitas rata-rata saat dengan  $K_1=4$  dan  $K_2=4$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	379.3715	406.4612	306.3296	273.9730
0.8	0.2	236.8398	253.7517	208.0083	186.0762
0.7	0.3	138.8311	148.7446	134.5682	120.4067
0.6	0.4	74.9376	80.2886	81.7319	73.1484
0.5	0.5	36.1389	38.7195	45.5561	40.7824
0.4	0.6	14.8025	15.8595	22.4327	20.0876
0.3	0.7	4.6836	5.0180	9.0874	8.1399
0.2	0.8	0.9251	0.9912	2.5811	2.3127
0.1	0.9	0.0578	0.0620	0.3087	0.2767

Dari Tabel 3.9 hingga Tabel 3.12 terlihat pengaruh jumlah  $K_1$  dan  $K_2$  berpengaruh terhadap *payoff* yang dihasilkan. Semakin banyak jumlah pengguna  $K_1$  dan  $K_2$  maka *payoff* yang dihasilkan akan semakin kecil. Hal ini terjadi dari aksi melakukan *sense* dan *nonsense*.

### 3.8 Skenario Pengujian

Pengujian yang dilakukan dimaksudkan agar bisa melakukan analisis terhadap hasil keluaran dari sistem. Yang akan diujikan dan dianalisis pada hasil keluaran sistem ini adalah sebagai berikut :

1. Pengamatan SNR pada sistem, *probability of false alarm* ( $P_{fa}$ ) dan level *threshold*
2. Pengamatan pemilihan strategi optimal yang diambil oleh pengguna *heavy traffic* dan pengguna *light traffic* sesuai dengan *payoff* yang diterima.

Parameter yang akan diukur agar bisa dinalisis nantinya adalah sebagai berikut :

1. Perubahan *probability of false alarm* ( $P_{fa}$ ) dan *probability detection* ( $P_d$ ) terhadap perubahan SNR sistem
2. Perubahan nilai  $P_d$  dan  $P_{fa}$  terhadap perubahan level *threshold*
3. Perubahan jumlah pengguna sekunder terhadap energi yang dipakai dalam melakukan *sensing* dan energi yang dipakai dalam melakukan transmisi data.

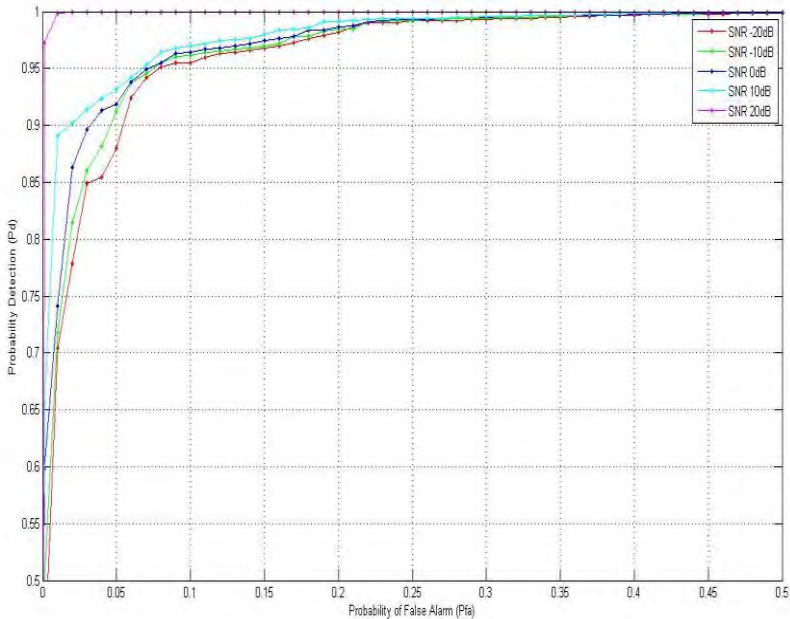
## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.1 *Spectrum Sensing menggunakan Matched Filter Detection*

Pada pengguna sekunder sinyal yang telah melewati kanal AWGN merupakan *input* dari *matched filter*. *Output* dari *matched filter* ini dibandingkan dengan *threshold* berdasarkan persamaan dari *probability of false alarm* dan *probability detection* dari *matched filter*. Beberapa faktor yang mempengaruhi *spectrum sensing* ini adalah perubahan SNR, *probability of false alarm* dan *threshold*.

#### 4.1.1 *Probability of False Alarm*

Dengan melakukan perubahan nilai  $P_{fa}$  dengan berbagai variasi nilai SNR maka dapat diperoleh ROC dari *matched filter* ini.



**Gambar 4.1** ROC untuk wimax pada berbagai variasi SNR

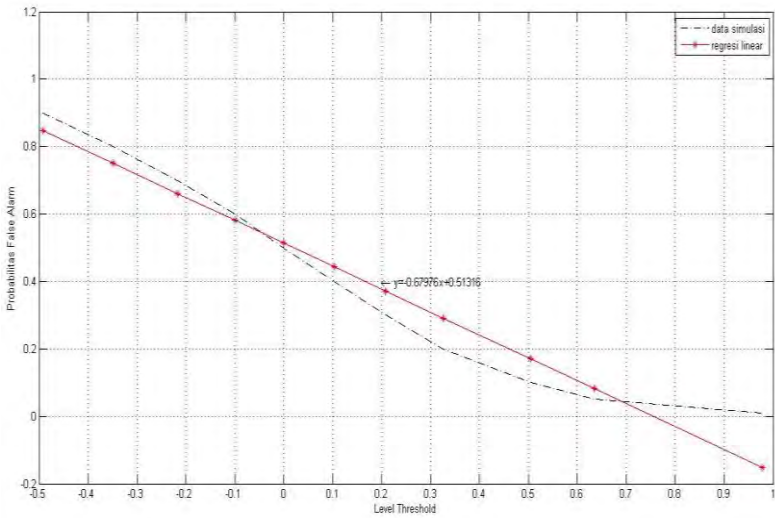
Dari Gambar 4.1 menunjukkan kurva ROC yang menyediakan informasi  $P_d$  vs  $P_{fa}$  dari berbagai SNR yang berbeda-beda. Nilai SNR terkecil adalah -20 dB dan nilai SNR terbesar adalah 20 dB. Dari Gambar 4.1 juga dapat diketahui bahwa jika SNR sistem dibuat menjadi semakin besar maka  $P_d$  dan  $P_{fa}$  sistem akan semakin besar juga.

Selanjutnya perubahan nilai  $P_{fa}$  terhadap *threshold* dan  $P_d$  dapat dilihat dari Tabel 4.1

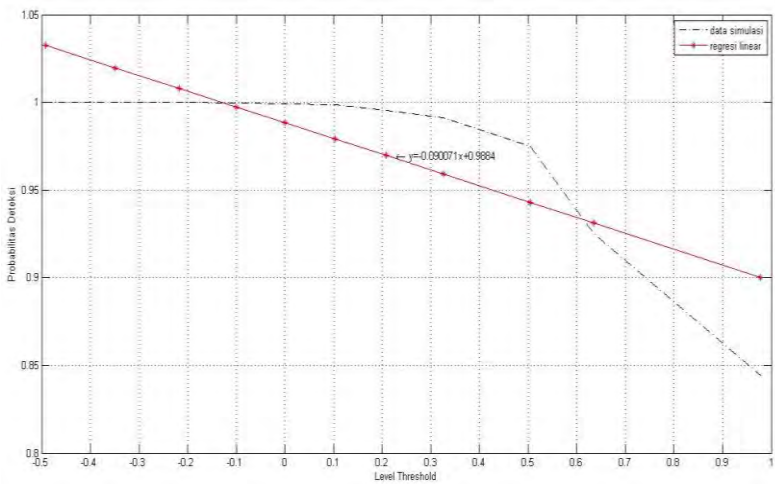
**Tabel 4.1** Perubahan nilai  $P_{fa}$  terhadap *threshold* dan  $P_d$

$P_{fa}$	<i>threshold</i>	$P_d$
0.01	0.9785	0.844
0.1	0.5038	0.972
0.2	0.3259	0.991
0.3	0.2081	0.995
0.4	0.1028	0.999
0.5	0	0.999
0.6	-0.0999	1
0.7	-0.2171	1
0.8	-0.3485	1
0.9	-0.4924	1

Dari Tabel 4.1 diketahui bahwa semakin rendah nilai  $P_{fa}$  yang diinputkan akan sangat mempengaruhi level *threshold* pada sistem. Perubahan nilai  $P_{fa}$  yang rendah hampir mendekati nol akan membuat level *threshold* semakin tinggi sehingga pendeteksian keberadaan pengguna primer pun semakin sulit. Selain mempengaruhi level *threshold* perubahan nilai  $P_{fa}$  juga akan berakibat pada perubahan nilai  $P_d$ . Dari Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa semakin tinggi nilai  $P_{fa}$  maka level *threshold* akan semakin rendah. Dengan penurunan level *threshold* ini nilai  $P_d$  juga semakin besar.



**Gambar 4.2** Perbandingan  $P_{fa}$  dengan Level Threshold saat SNR 10 dB



**Gambar 4.3** Perbandingan  $P_d$  dengan Level Threshold saat SNR 10 dB

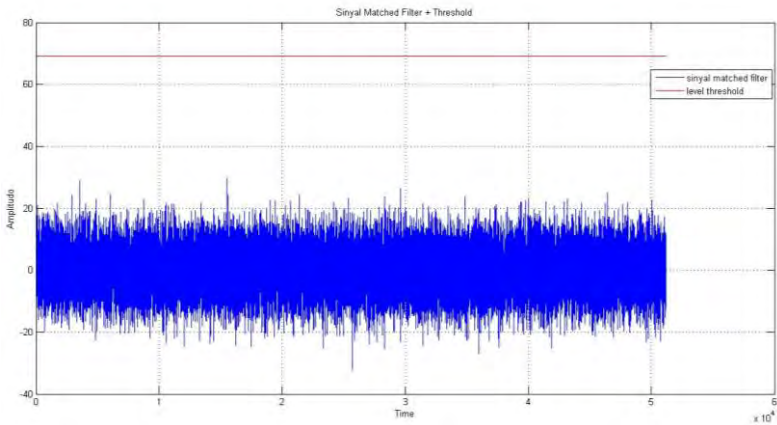
4.1.2 SNR

Perubahan nilai SNR pada sistem akan menghasilkan *output* yang berbeda-beda seperti pada Tabel 4.2. *Threshold* pada sistem didapat dengan cara menentukan  $P_{fa}$  pada sistem terlebih dahulu.  $P_{fa}$  yang ditetapkan pada sistem ini adalah sebesar 0.01.

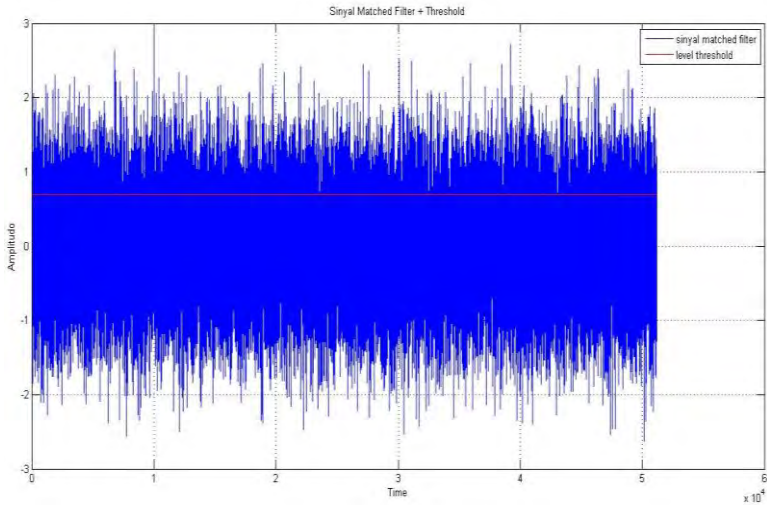
Tabel 4.2 Perubahan nilai SNR sistem

SNR (dB)	<i>threshold</i>	$P_d$
-20	692.7149	0.7415
-10	69.4839	0.7437
0	6.9562	0.7468
10	0.7034	0.7533
15	0.2244	0.7650
20	0.0747	0.8131

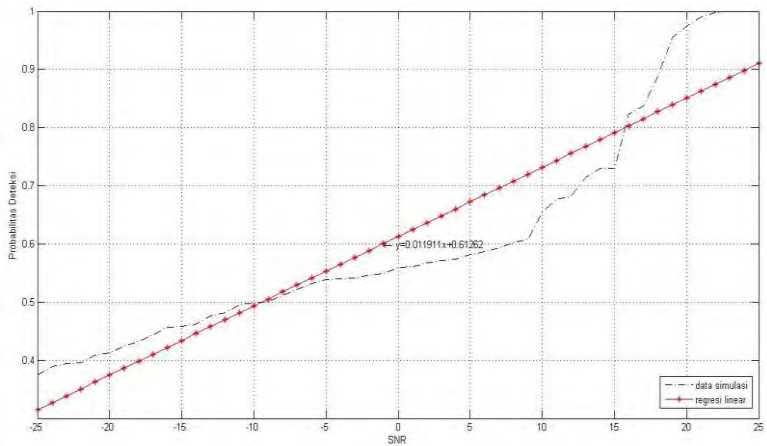
Dari Tabel 4.2 diketahui bahwa pengujian yang dilakukan terhadap perubahan nilai SNR dengan rentang -20dB sampai 20dB, maka dapat dilihat adanya perubahan nilai pada *threshold* dan nilai  $P_d$ . Dengan semakin besar nilai SNR yang diinputkan maka penurunan level *threshold* pun semakin drastis. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan Gambar 4.5



Gambar 4.4 Level *Threshold* pada SNR -10dB



**Gambar 4.5** Level *Threshold* pada SNR 0dB



**Gambar 4.6** Perbandingan SNR dengan  $P_d$

Dari Gambar 4.6 dapat diketahui bahwa Dengan nilai  $P_{fa}$  yang sama, kenaikan nilai SNR pada sistem akan mempengaruhi level



*threshold* dan probabilitas deteksinya. Semakin tinggi nilai SNR suatu sistem maka level *threshold* sistem akan semakin rendah.

#### 4.2 Pengaruh *non-cooperative game* dalam *cooperative sensing*

Dalam hal ini dapat diketahui *throughput* dari setiap pengguna *sensing* ketika pengguna primer tidak ada dan ketika tidak ada alarm palsu yang dibangkitkan sebagai  $R_{Ho}(T_s)$ . Dengan  $\sigma=0.5$  dan  $C_{H_0}=1.41\text{Mbps}$ , *throughput* dari setiap pengguna sekunder dapat dilihat dari Tabel 4.3.

**Tabel 4.3** *Throughput*  $R_{Ho}(T_s)$

Pengguna Sekunder	$P_{FA}$	$R_{Ho}(T_s)$ dalam Mbps
SU1	0.6742	0.2297
SU2	0.7000	0.2115
SU3	0.7024	0.2098
SU4	0.7049	0.2080
SU5	0.6742	0.2297
SU6	0.7000	0.2115
SU7	0.7024	0.2098
SU8	0.7049	0.2080

Dari Tabel 4.3 diketahui pengaruh  $\sigma$  sebagai perbandingan antara durasi *sensing* dari setiap frame dengan durasi setiap frame mempengaruhi *throughput*  $R_{Ho}(T_s)$ . Semakin besar nilai  $\sigma$  maka *throughput* semakin kecil. Hal ini menandakan bahwa semakin banyak membutuhkan energi yang dipakai untuk melakukan *sensing* maka dampak *throughput* dari setiap pengguna sekunder semakin berkurang. Jika diasumsikan bahwa  $\rho_{H_0} \approx 1$  dan  $C_{H_1} \ll C_{H_0}$  maka *throughput* yang terjangkau dapat dikira-kira sebagai berikut:

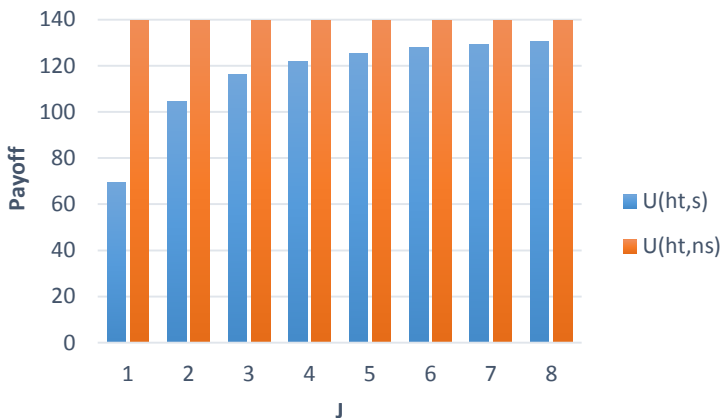
**Tabel 4.4** *Throughput*  $R(T_s)$

Pengguna Sekunder	$R_{Ho}(T_s)$	$R(T_s)$ Mbps	Pengguna Sekunder	$R_{Ho}(T_s)$	$R(T_s)$ Mbps
SU1	0.2297	0.2274	SU5	0.2297	0.2274
SU2	0.2115	0.2094	SU6	0.2115	0.2094
SU3	0.2098	0.2077	SU7	0.2098	0.2077
SU4	0.2080	0.2059	SU8	0.2080	0.2059

Dari Tabel 4.4 diketahui *throughput*  $R(T_s)$  yang dapat dijangkau bergantung pada  $P_{FA}$  sebelumnya. Semakin kecil nilai  $P_{FA}$  maka kemungkinan mendapatkan  $R(T_s)$  semakin lebih besar.

### 4.3 Pengaruh *non-cooperative game* dalam pengguna sekunder

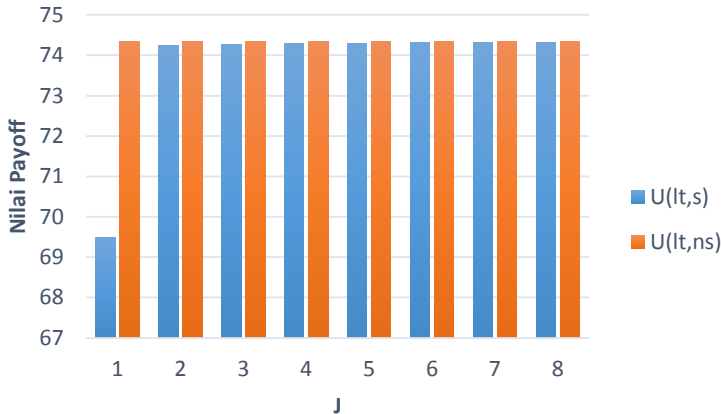
Dari trafik heterogen diketahui ada pengguna *heavy traffic* dan pengguna *light traffic*. Pengaruh *non-cooperative game* ini terhadap pengguna *heavy traffic* dapat dilihat dari Gambar 4.7.



**Gambar 4.7** *Payoff* pengguna *heavy traffic* melakukan “sense” dan “nonsense”

Dari gambar 4.7 pengumpulan data untuk pengguna *heavy traffic* dapat diketahui bahwa *payoff* yang diterima saat menjadi *free rider* lebih besar dibandingkan dengan *payoff* yang diterima saat akan berkontribusi dalam *cooperative sensing*, sehingga setiap pengguna sekunder akan cenderung menjadi *free rider*. Karena tidak ada nilai *payoff* yang melebihi nilai 139.39 sehingga perilaku pengguna *heavy traffic* menjadi rasional. Hal yang sama juga ternyata dijumpai pada pengguna *light traffic*. Dari Gambar 4.8 pengumpulan data untuk pengguna *light traffic* dapat diketahui bahwa *payoff* yang diterima saat menjadi *free rider* lebih besar dibandingkan dengan *payoff* yang diterima saat berkontribusi dalam *cooperative sensing*, sehingga setiap pengguna sekunder akan cenderung

menjadi *free rider* juga. Karena tidak ada nilai *payoff* yang melebihi nilai 74.3367 sehingga perilaku pengguna *light traffic* menjadi rasional juga.



**Gambar 4.8** *Payoff* pengguna *light traffic* melakukan “sense” dan “nonsense”

Untuk mencari *nash equilibrium* dari *pure strategy* ini dapat dilakukan pengamatan sebagai berikut:

1. Pengamatan untuk  $J=1$

Pemain : *heavy traffic user* dan *light traffic user*

Pilihan : *sense* dan *nonsense*

Strategi :

- a. *heavy traffic user* melakukan *sense* dan *light traffic user* melakukan *nonsense*  
maka *payoff* yang diterima *heavy traffic user* sebesar 69.4950 sedangkan *light traffic user* mendapatkan 74.3367
- b. *light traffic user* melakukan *sense* dan *heavy traffic user* melakukan *nonsense*  
maka *payoff* yang diterima *light traffic user* sebesar 69.4950 sedangkan *heavy traffic user* mendapatkan 139.39
- c. *heavy traffic user* dan *light traffic user* sama-sama melakukan *sensing*  
maka *payoff* yang diterima *heavy traffic user* sebesar 69.4950 sedangkan *light traffic user* mendapatkan 69.4950

- d. *heavy traffic user* dan *light traffic user* tidak ada yang melakukan *sensing* maka *payoff* yang diterima *heavy traffic user* sebesar 139.39 sedangkan *light traffic user* mendapatkan 74.3367

*Payoff* matriks : A = *heavy traffic user*, B = *light traffic user*

B \ A	sense	non sense
sense	69.495	139.39
	69.495	69.495
non sense	69.495	139.39
	74.3367	74.3367

Untuk mencari *nash equilibrium* maka harus dilakukan pengamatan untuk mengetahui strategi terbaik dari pemain. Jadi, apa yang menjadi respon terbaik bagi A dan B jika keduanya rasional?

1. Jika B selalu melakukan *sense* maka A akan melakukan *nonsense* karena  $139.39 > 69.495$
2. Jika B selalu melakukan *nonsense* maka A akan melakukan *nonsense* karena  $139.39 > 69.495$
3. Jika A selalu melakukan *sense* maka B akan melakukan *nonsense* karena  $74.3367 > 69.495$
4. Jika A selalu melakukan *nonsense* maka B akan melakukan *nonsense* karena  $74.3367 > 69.495$

Maka *payoff* matriks menjadi:

B \ A	sense	non sense
sense	69.495	<b>139.39</b>
	69.495	69.495
non sense	69.495	<b>139.39</b>
	<b>74.3367</b>	<b>74.3367</b>

Dari *payoff* matriks diatas didapat 1 *nash equilibrium* yakni *pure nash equilibrium* yaitu (*non sense* , *non sense*). Maka respon terbaik dari kedua pemain adalah sama-sama tidak melakukan *sense*.

2. Pengamatan untuk J=8

Pemain : *heavy traffic user* dan *light traffic user*

Pilihan : *sense* dan *nonsense*

Strategi :

- a. *heavy traffic user* melakukan *sense* dan *light traffic user* melakukan *nonsense*  
maka *payoff* yang diterima *heavy traffic user* sebesar 130.6531  
sedangkan *light traffic user* mendapatkan 74.3367
- b. *light traffic user* melakukan *sense* dan *heavy traffic user* melakukan *nonsense*  
maka *payoff* yang diterima *light traffic user* sebesar 74.3117  
sedangkan *heavy traffic user* mendapatkan 139.39
- c. *heavy traffic user* dan *light traffic user* sama-sama melakukan *sensing*  
maka *payoff* yang diterima *heavy traffic user* sebesar 130.6531  
sedangkan *light traffic user* mendapatkan 74.3117
- d. *heavy traffic user* dan *light traffic user* tidak ada yang melakukan *sensing*  
maka *payoff* yang diterima *heavy traffic user* sebesar 139.39  
sedangkan *light traffic user* mendapatkan 74.3367

*Payoff* matriks : A = *heavy traffic user*, B = *light traffic user*

B \ A	sense	non sense
sense	130.6531	139.39
	74.3117	74.3117
non sense	130.6531	139.39
	74.3367	74.3367

Apa respon terbaik bagi A dan B jika keduanya rasional dalam arti mementingkan kepentingan sendiri-sendiri?

1. Jika B selalu melakukan *sense* maka A melakukan *nonsense* karena  $139.39 > 130.6531$
2. Jika B selalu melakukan *nonsense* maka A melakukan *nonsense* karena  $139.39 > 130.6531$
3. Jika A selalu melakukan *sense* maka B melakukan *nonsense* karena  $74.3367 > 74.3117$
4. Jika A selalu melakukan *nonsense* maka B melakukan *nonsense* karena  $74.3367 > 74.3117$

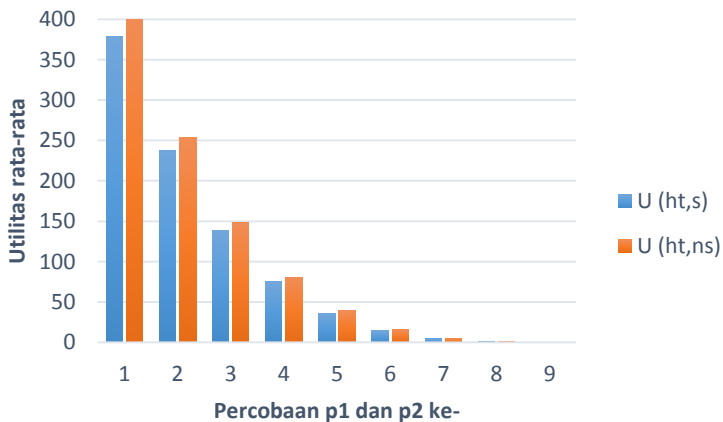
Maka *payoff* matriks menjadi:

B \ A	sense	non sense
	sense	non sense
sense	130.6531	<b>139.39</b>
	74.3117	74.3117
non sense	130.6531	<b>139.39</b>
	<b>74.3367</b>	<b>74.3367</b>

Dari *payoff* matriks ini juga didapat 1 *nash equilibrium* yakni *pure nash equilibrium* yaitu (*non sense* , *non sense*). Maka respon terbaik dari kedua pemain adalah sama-sama tidak melakukan *sense*.

#### 4.4 Pengaruh banyaknya pengguna sekunder

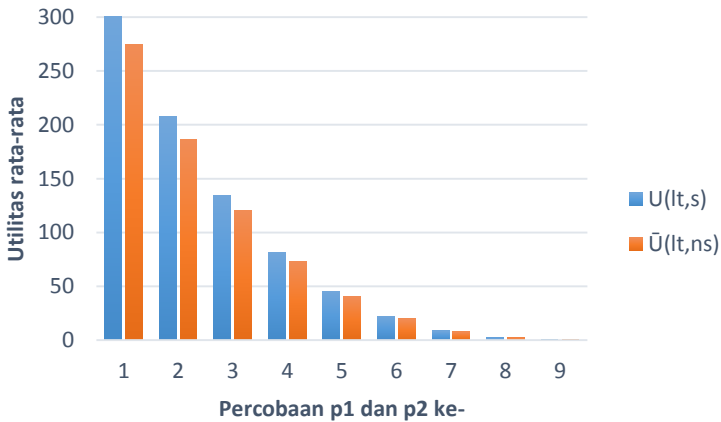
Dengan mempertimbangkan  $p_1$  sebagai probabilitas dari satu pengguna *heavy traffic* melakukan *sensing* dan  $p_2$  sebagai probabilitas dari satu pengguna *light traffic* melakukan *sensing* maka didapatkan utilitas dari setiap pengguna sekunder dalam pilihan untuk melakukan “sense” dan “nonsense”. Pengaruh adanya fungsi utilitas rata-rata dari *pure strategy* ini terhadap pengguna *heavy traffic* dapat dilihat dari Gambar 4.9.



**Gambar 4.9** Utilitas rata-rata Pengguna *Heavy Traffic* Melakukan “sense” dan “nonsense”

Dari Gambar 4.9, untuk percobaan ke-1 saat  $p_1 = 0.9$  dan  $p_2 = 0.1$  hingga percobaan ke-9 saat  $p_1 = 0.1$  dan  $p_2 = 0.9$  utilitas rata-rata pengguna ini semakin berkurang. Utilitas rata-rata saat melakukan “nonsense” lebih besar dibandingkan melakukan “sense” sehingga kecenderungan perilaku pengguna ini tidak berkontribusi dalam *cooperative sensing* lebih besar.

Selanjutnya dari pengaruh adanya fungsi utilitas rata-rata dari *pure strategy* ini terhadap pengguna *heavy traffic* dapat dilihat pada Gambar 4.10.



**Gambar 4.10** Utilitas rata-rata Pengguna *Light Traffic* Melakukan “sense” dan “nonsense”

Dari Gambar 4.10, untuk percobaan ke-1 saat  $p_1 = 0.9$  dan  $p_2 = 0.1$  hingga percobaan ke-9 saat  $p_1 = 0.1$  dan  $p_2 = 0.9$  utilitas rata-rata pengguna ini semakin berkurang. Utilitas rata-rata saat melakukan “sense” lebih besar dibandingkan melakukan “nonsense” sehingga kecenderungan perilaku pengguna ini berkontribusi dalam *cooperative sensing* lebih besar.

Pengaruh  $p_1$  dan  $p_2$  menunjukkan bagaimana perilaku kedua jenis pengguna ini dalam berpartisipasi dalam *cooperative sensing*. Hal ini diperoleh dari utilitas rata-rata yang mereka capai. Pengamatan lainnya diperoleh bahwa pengguna *heavy traffic* lebih bertanggung jawab dalam *sensing* ( $p_2 < p_1$ ) karena mereka yang akan mengalami kerugian lebih jika tidak ada pengguna yang melakukan *sensing*.

Untuk mencari *nash equilibrium* dari *pure strategy* ini juga dapat dilakukan pengamatan sebagai berikut:

1.  $p_1=0.7$  dan  $p_2=0.3$

Pemain : *heavy traffic user* dan *light traffic user*

Pilihan : *sense* dan *nonsense*

Strategi :

- a. *heavy traffic user* melakukan *sense* dan *light traffic user* melakukan *nonsense*  
maka *payoff* yang diterima *heavy traffic user* sebesar 138.8311 sedangkan *light traffic user* mendapatkan 120.4067
- b. *light traffic user* melakukan *sense* dan *heavy traffic user* melakukan *nonsense*  
maka *payoff* yang diterima *light traffic user* sebesar 134.5682 sedangkan *heavy traffic user* mendapatkan 148.7446
- c. *heavy traffic user* dan *light traffic user* sama-sama melakukan *sensing*  
maka *payoff* yang diterima *heavy traffic user* sebesar 138.8311 sedangkan *light traffic user* mendapatkan 134.5682
- d. *heavy traffic user* dan *light traffic user* tidak ada yang melakukan *sensing*  
maka *payoff* yang diterima *heavy traffic user* sebesar 148.7446 sedangkan *light traffic user* mendapatkan 120.4067

*Payoff* matriks : A = *heavy traffic user*, B = *light traffic user*

B \ A	sense	non sense
	sense	non sense
sense	138.8311	148.7446
	134.5682	134.5682
non sense	138.8311	148.7446
	120.4067	120.4067

Apa respon terbaik bagi A dan B jika keduanya rasional dalam arti mementingkan kepentingan sendiri-sendiri?

1. Jika B selalu melakukan *sense* maka A melakukan *nonsense* karena  $148.7446 > 138.8311$
2. Jika B selalu melakukan *nonsense* maka A melakukan *nonsense* karena  $148.7446 > 138.8311$
3. Jika A selalu melakukan *sense* maka B melakukan *sense* karena  $134.5682 > 120.4067$



4. Jika A selalu melakukan non sense maka B melakukan *nonsense* karena  $134.5682 > 120.4067$

Maka *payoff* matriks menjadi:

B \ A	sense	non sense
sense	138.8311	<b>148.7446</b>
	<b>134.5682</b>	<b>134.5682</b>
non sense	138.8311	<b>148.7446</b>
	120.4067	120.4067

Dari *payoff* matriks ini juga didapat 1 *nash equilibrium* yakni *pure nash equilibrium* yaitu (*non sense* , *sense*). Maka respon terbaik dari kedua pemain adalah A melakukan *nonsense* dan B melakukan *sense*.

2.  $p_1=0.5$  dan  $p_2=0.5$

Pemain : *heavy traffic user* dan *light traffic user*

Pilihan : *sense* dan *nonsense*

Strategi :

- heavy traffic user* melakukan *sense* dan *light traffic user* melakukan *nonsense*  
maka *payoff* yang diterima *heavy traffic user* sebesar 36.1389 sedangkan *light traffic user* mendapatkan 40.7824
- light traffic user* melakukan *sense* dan *heavy traffic user* melakukan *nonsense*  
maka *payoff* yang diterima *light traffic user* sebesar 45.5561 sedangkan *heavy traffic user* mendapatkan 38.7195
- heavy traffic user* dan *light traffic user* sama-sama melakukan *sensing*  
maka *payoff* yang diterima *heavy traffic user* sebesar 36.1389 sedangkan *light traffic user* mendapatkan 45.5561
- heavy traffic user* dan *light traffic user* tidak ada yang melakukan *sensing*  
maka *payoff* yang diterima *heavy traffic user* sebesar 38.7195 sedangkan *light traffic user* mendapatkan 40.7824

*Payoff* matriks : A = *heavy traffic user*, B = *light traffic user*

B \ A	sense	non sense
	sense	non sense
sense	36.1389	38.7195
	45.5561	45.5561
non sense	36.1389	38.7195
	40.7824	40.7824

Apa respon terbaik bagi A dan B jika keduanya rasional dalam arti mementingkan kepentingan sendiri-sendiri?

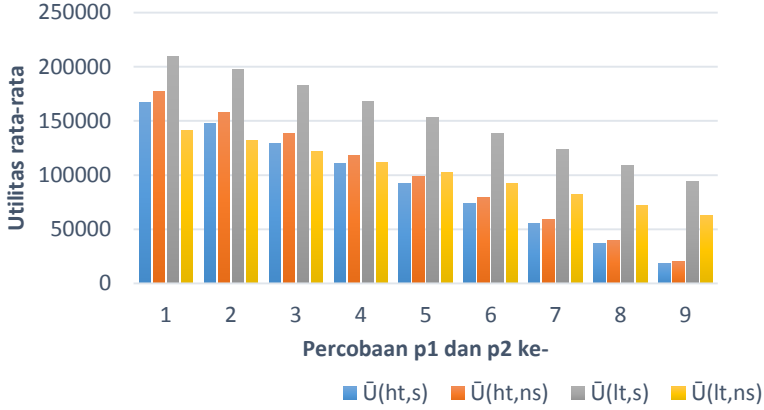
1. Jika B selalu melakukan *sense* maka A melakukan *nonsense* karena  $38.7195 > 36.1389$
2. Jika B selalu melakukan *nonsense* maka A melakukan *nonsense* karena  $38.7195 > 36.1389$
3. Jika A selalu melakukan *sense* maka B melakukan *sense* karena  $45.5561 > 40.7824$
4. Jika A selalu melakukan non sense maka B melakukan *nonsense* karena  $45.5561 > 40.7824$
- 5.

Maka *payoff* matriks menjadi:

B \ A	sense	non sense
	sense	non sense
sense	36.1389	<b>38.7195</b>
	<b>45.5561</b>	<b>45.5561</b>
non sense	36.1389	<b>38.7195</b>
	40.7824	40.7824

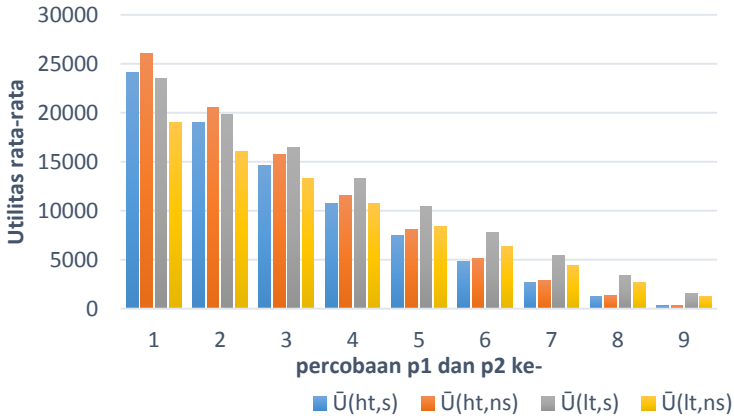
Dari *payoff* matriks ini juga didapat 1 *nash equilibrium* yakni *pure nash equilibrium* yaitu (*non sense* , *sense*). Maka respon terbaik dari kedua pemain adalah A melakukan *nonsense* dan B melakukan *sense*.

Dari variasi jumlah  $K_1$  dan  $K_2$  sangat berpengaruh pada kontribusi para pemain dalam berkontribusi dalam *cooperative sensing*. Pengamatan yang dilakukan pada Gambar 4.11 hingga Gambar 4.14 menunjukkan semakin banyak pengguna yang berpartisipasi maka nilai utilitas rata-rata yang mereka peroleh semakin kecil.



**Gambar 4.11** Utilitas rata-rata dengan  $K_1=1$  dan  $K_2=1$

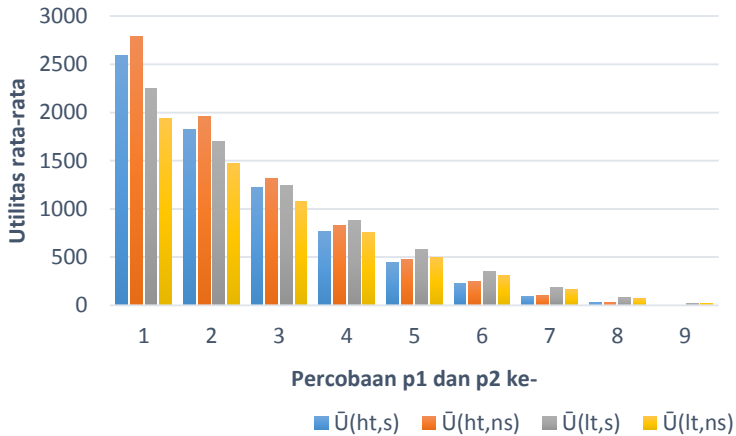
Dari gambar 4.11 nilai utilitas rata-rata saat probabilitas kedua pemain sama adalah  $\bar{U}_{ht,s} = 92565$ ;  $\bar{U}_{ht,ns} = 98733,33$ ;  $\bar{U}_{lt,s} = 153034$  dan  $\bar{U}_{lt,ns} = 102022,67$ . Hasil ini menunjukkan perilaku yang mau berkontribusi dalam *cooperative sensing* adalah pengguna *light traffic*.



**Gambar 4.12** Utilitas rata-rata dengan  $K_1=2$  dan  $K_2=2$

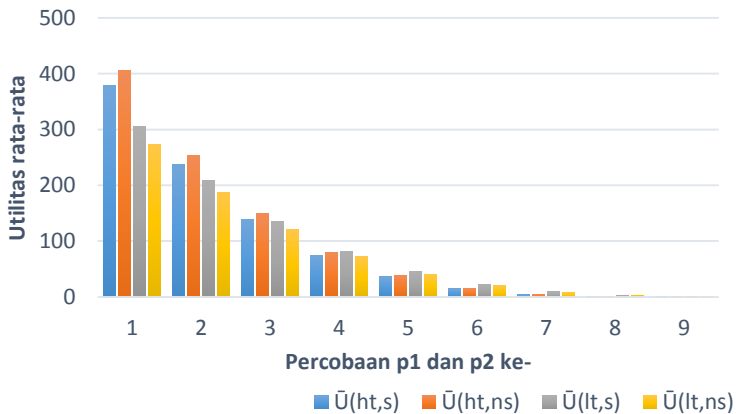
Dari gambar 4.12 nilai utilitas rata-rata saat probabilitas kedua pemain sama adalah  $\bar{U}_{ht,s} = 7432,9$ ;  $\bar{U}_{ht,ns} = 8040$ ;  $\bar{U}_{lt,s} = 10385,25$  dan

$\bar{U}_{lt,ns} = 8397,6$ . Hasil ini juga menunjukkan perilaku yang mau berkontribusi dalam *cooperative sensing* adalah pengguna *light traffic*.



**Gambar 4.13** Utilitas rata-rata dengan  $K_1=3$  dan  $K_2=3$

Dari gambar 4.13 nilai utilitas rata-rata saat probabilitas kedua pemain sama adalah  $\bar{U}_{ht,s} = 444,2417$  ;  $\bar{U}_{ht,ns} = 478,5$ ;  $\bar{U}_{lt,s} = 581,4338$  dan  $\bar{U}_{lt,ns} = 502,4079$ . Hasil ini juga menunjukkan perilaku yang mau berkontribusi dalam *cooperative sensing* adalah pengguna *light traffic*.



**Gambar 4.14** Utilitas rata-rata dengan  $K_1=4$  dan  $K_2=4$

Dari gambar 4.14 nilai utilitas rata-rata saat probabilitas kedua pemain sama adalah  $\bar{U}_{ht,s} = 36,1389$  ;  $\bar{U}_{ht,ns} = 38,7195$ ;  $\bar{U}_{lt,s} = 45,5561$  dan  $\bar{U}_{lt,ns} = 40,7824$ . Hasil ini juga menunjukkan perilaku yang mau berkontribusi dalam *cooperative sensing* adalah pengguna *light traffic*.

Dengan nilai  $e_{txt}$  tetap, partisipasi pengguna sekunder akan semakin berkurang ketika jumlah pengguna sekunder bertambah. Hal ini menandakan karena semakin banyak pengguna maka setiap pengguna mencoba untuk menjadi *free rider* dan menjadi berkurang untuk berkontribusi dalam *sensing*. Hal yang sama juga berlaku untuk nilai  $\sigma$  tetap maka *payoff* yang diterima akan semakin kecil berimbas dengan semakin bertambahnya jumlah  $K_1$  dan  $K_2$ .

## **BAB V**

### **PENUTUP**

Berdasarkan dari apa yang dikerjakan dalam tugas akhir tentang Penginderaan Spektrum Terdistribusi untuk Jaringan Radio Kognitif pada Trafik Heterogen, meliputi tahap perencanaan blok sistem, simulasi sistem, pengujian sistem dan pengaruh *game theory* yang digunakan terdapat beberapa kesimpulan yang dapat diambil sebagai berikut.

#### **5.1. Kesimpulan**

Dari analisis yang dilakukan pada bab sebelumnya dapat ditarik beberapa kesimpulan :

1. Semakin rendah nilai *probability of false alarm* yang digunakan akan sangat mempengaruhi level *threshold* sistem, dimana perubahan nilai  $P_{fa}$  yang semakin kecil mendekati nol akan membuat level *threshold* semakin tinggi sehingga pendeteksian pengguna primer akan semakin sulit. Jika  $P_{fa}$  tinggi maka tingkat pemanfaatan spektrum akan dikurangi
2. Dengan kondisi biaya energi untuk melakukan transmisi data ( $e_{txt}$ ) sebesar 0,2 dan biaya energi untuk melakukan *sensing* ( $\sigma$ ) sebesar 0,4 tetap maka partisipasi pengguna sekunder akan semakin berkurang ketika jumlah pengguna sekunder bertambah.
3. Respon terbaik diperoleh saat ada titik *nash equilibrium* yang ditemukan dalam matriks *payoff* yang dibuat. Hasil simulasi menunjukkan saat probabilitas kedua pemain sama-sama 0.5 maka respon terbaik yang diperoleh adalah hanya pengguna *light traffic* yang mau berpartisipasi dalam *cooperative sensing*.

#### **5.2. Saran**

Dari tugas akhir yang dilakukan masih terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan pada penelitian selanjutnya. Berikut saran-saran untuk pengembangan radio kognitif.

1. Untuk kedepannya bisa menggunakan metode lain kemudian membandingkan masing-masing metode sehingga bisa ditentukan metode apa yang paling bagus sesuai dengan keadaan lingkungan suatu sistem yang beragam.

2. Pertambahan jumlah  $K_1$  dan  $K_2$  sangat berpengaruh dalam *non-cooperative game* yang digunakan, hal ini juga membutuhkan pengetahuan tentang fungsi utilitas rata-rata yang digunakan dan pertukaran informasi dari setiap pengguna, sehingga dapat dicari analisis menggunakan algoritma yang lain sesuai dengan keadaan lingkungannya.
3. Perkembangan *game theory* telah mengarah kepada *evolutionary game theory* sehingga untuk penelitian selanjutnya dapat dilakukan perbandingan dengan berbagai *game theory* yang digunakan.

## LAMPIRAN A

### PROPOSAL TUGAS AKHIR

Jurusan Teknik Elektro – FTI  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

TE 091399 TUGAS AKHIR – 4 SKS

Nama Mahasiswa : Saut Martua Jahenda Siringoringo  
Nomor Pokok : 22 12 105 069  
Bidang Studi : Telekomunikasi Multimedia  
Tugas Diberikan : Semester Genap Th. 2013/2014  
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Wirawan, DEA  
Judul Tugas Akhir : **Penginderaan Spektrum Terdistribusi untuk Jaringan Radio Kognitif pada Trafik Heterogen**  
(*Distributed Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks with Heterogeneous Traffic*)

26 FEB 2014

#### Uraian Tugas Akhir :

Konsep radio kognitif tercipta dilatarbelakangi oleh tuntutan masalah pengelolaan spektrum yang efisien dan ketersediaan spektrum yang semakin terbatas. Penginderaan spektrum adalah salah satu bagian penting dari teknologi radio kognitif yang dapat mendeteksi kanal bebas dari *primary user* dan juga dapat mencegah *primary user* menerima interferensi berlebihan dari *secondary user*.

*Cooperative Sensing Spectrum* telah dikenal sebagai pendekatan yang kuat dalam meningkatkan kehandalan dan kinerja deteksi dari sistem. Namun skenario kooperatif ini tidak selamanya realistis dalam beberapa situasi misalnya timbul masalah jika *secondary user* menggunakan sistem yang berbeda, persyaratan spektrumnya berbeda, atau jika tidak ada otorisasi pusat dalam mengatur hal ini.

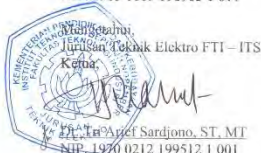
Tugas akhir ini dilakukan dengan mempertimbangkan jaringan kognitif radio dengan pengguna trafik yang padat dan pengguna trafik yang biasa dan menganalisa perilaku mereka terhadap penginderaan menggunakan konsep Nash equilibrium. Perumusan masalah dan rangka kerja *game theory* ini menggunakan *energy detector* dan *non-cooperative game* untuk *cooperative sensing*. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisa penginderaan spektrum sebagai sebuah *evolutionary game*.

Kata kunci – *Cognitive radio; Sensing spectrum; Nash equilibrium; Evolution game theory.*

Dosen Pembimbing,



Dr. Ir. Wirawan, DEA  
NIP. 1963 1109 198903 1 011



Ketua,  
Jurusan Teknik Elektro FTI – ITS  
Dr. Ir. Endroyono, ST, MT  
NIP. 1970 0212 199512 1 001

Menyetujui,  
Bidang Studi Telekomunikasi Multimedia  
Koordinator,

Dr. Ir. Endroyono, DEA  
NIP. 1965 0404 199102 1 001

26/2/2014



**A. Judul Tugas Akhir**

Penginderaan Spektrum Terdistribusi untuk Jaringan Radio Kognitif pada Trafik Heterogen  
*(Distributed Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks with Heterogeneous Traffic)*

**B. Ruang Lingkup**

1. Sistem Komunikasi Digital
2. Jaringan dan Rekayasa Trafik
3. *Game Theory*

**C. Latar Belakang**

Tuntutan komunikasi nirkabel yang handal dan kapasitas sistem yang tinggi tidak terlepas dari ketersediaan *resource* berupa spektrum frekuensi yang cukup. Pengelolaan spektrum yang efisien dan ketersediaan spektrum yang semakin terbatas menjadi latar belakang terciptanya konsep radio kognitif. Pada sistem komunikasi nirkabel, spektrum frekuensi memegang peranan penting sebagai media pembawa informasi antara pemancar dan penerima pada jarak tertentu. Perkembangan teknologi khususnya teknologi perangkat nirkabel yang semakin maju mengakibatkan semakin beragamnya informasi baik berupa suara, data dan video yang dilewatkan pada spektrum frekuensi. Hal ini nantinya yang akan mengakibatkan kebutuhan jalur frekuensi juga semakin meningkat.

Di berbagai negara, akses terhadap sumber daya radio diatur oleh lembaga pemerintah. Spektrum diberikan kepada jaringan penyedia layanan, organisasi ataupun lembaga-lembaga baik swasta maupun milik pemerintah. Dari studi yang dilakukan oleh FCC dan studi independen di beberapa negara menunjukkan bahwa sebagian besar pita frekuensi tidak termanfaatkan secara efisien. Sebagai contoh, di sebagian besar negara di dunia pita jaringan selular sangat padat sementara radio amatir dan frekuensi paging sangat jarang dimanfaatkan. Hal ini mendorong berkembangnya radio kognitif.

Dalam sistem radio kognitif, *spectrum sensing* merupakan salah satu fungsi utama yang dapat digunakan sebagai mekanisme untuk

mendeteksi kekosongan spektrum. Spektrum frekuensi adalah sumber daya terbatas sehingga pengalokasian dan pemanfaatannya telah diatur oleh badan dunia seperti *International Telecommunication Union* (ITU). Agar pemanfaatan frekuensi tersebut tidak mengganggu pengguna utama maka peranan *spectrum sensing* bagi pengguna sekunder dapat memanfaatkan frekuensi kosong pada waktu tertentu dimana pengguna utama tidak memanfaatkannya dapat dilakukan.

Seiring perkembangan waktu kebutuhan trafik juga berkembang mengarah kepada trafik heterogen. Dengan adanya multi *user*, multi teknologi, multi aplikasi, multi *provider environment* sekarang ini maka dibutuhkan pengembangan teknologi dan standard yang menyediakan *dynamic automatic network selection decision*. Untuk itu dibutuhkan suatu teknik yang dapat memodelkan bagaimana interaksi dari pengguna trafik biasa dan pengguna trafik padat, sehingga dicapai suatu keputusan yang rasional untuk dilakukannya *sensing*.

Seiring perkembangan waktu perkembangan jaringan yang semula dari jaringan telepon terpusat (*centralized*) menjadi jaringan internet yang terdesentralisasi (alasan skalabilitas). Desentralisasi atau deregulasi menjadi faktor kunci adanya pertimbangan tingkah laku setiap pengguna. Dalam kenyataannya selalu ada pengguna yang egois yang mencoba untuk mengubah tingkah laku mereka semata-mata demi keuntungan mereka sendiri dan dapat saja mengorbankan kinerja jaringan. Bagaimana menganalisis ini, bagaimana mengontrol dan mencegah hal seperti ini, inilah menjadi tujuan dikenalnya *non-cooperative game theory*.

#### **D. Rumusan Masalah**

Permasalahan yang diangkat dalam penyusunan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana melakukan simulasi *spectrum sensing* menggunakan teknik *matched filter detection*
2. Bagaimana mengetahui strategi yang diambil oleh pengguna trafik biasa (*light traffic*) dan pengguna trafik padat (*heavy traffic*) dalam hubungannya dengan *non-cooperative game theory*.

## **E. Batasan Masalah**

Batasan permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Asumsi *spectrum sharing* dan *spectrum handoff* tidak ada permasalahan dan dianggap ideal.
2. Arsitektur jaringan kognitif radio yang digunakan yaitu arsitektur radio kognitif terdistribusi dan tidak dilakukan perbandingan dan analisis dengan arsitektur radio kognitif *centralized* (terpusat).
3. Terdapat banyak teknik atau aturan yang dipakai dalam *spectrum sensing* maka dalam tugas akhir ini hanya digunakan dengan menggunakan *matched filter*.
4. Teori permainan yang digunakan adalah *non-cooperative game theory*.

## **F. Tujuan dan Manfaat**

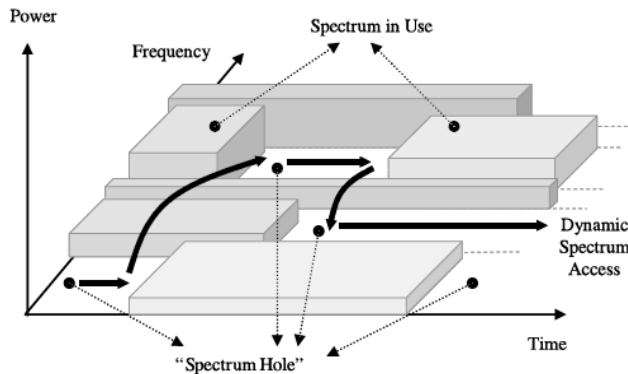
Tujuan dari tugas akhir ini adalah mengetahui kinerja *spectrum sensing* menggunakan metode deteksi *matched filter* dan mengetahui bagaimana perilaku pengguna *light traffic* dan pengguna *heavy traffic* dalam memanfaatkan *spectrum sensing* dalam jaringan radio kognitif.

## **G. Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori**

### **1. Radio Kognitif**

Radio kognitif (*Cognitive Radio* atau CR) pertama kali diperkenalkan oleh Joseph Mitola yang menyebutkan bahwa radio kognitif sebagai sebuah radio yang benar-benar cerdas (*smart*) yang memiliki kesadaran diri (*self-aware*), kesadaran RF (*RF-aware*), pengguna peduli (*user-aware*) yang akan mencakup teknologi bahasa dan visi mesin yang mempunyai pengetahuan yang tinggi terhadap lingkungan radio[1]. Menurut Haykins, radio kognitif sebagai sebuah radio yang mempunyai kepedulian akan lingkungan sekelilingnya, belajar dan beradaptasi mengubah parameter operasinya secara *real-time* dengan tujuan menyediakan kapanpun, dimanapun spektral frekuensi yang efisien[2]. Tujuan utama dari radio kognitif ini adalah untuk mendapatkan ketersediaan spektrum kosong terbaik melalui kemampuan kognitif dan rekonfigurasi yang telah dijelaskan sebelumnya[4]. Sejak kebanyakan dari spektrum sudah banyak digunakan, maka tantangan

terpenting adalah untuk men-*share* spektrum berlisensi tanpa mengganggu pengguna utamanya seperti diilustrasikan pada Gambar 1.



**Gambar 1** Konsep *Spectrum Hole*

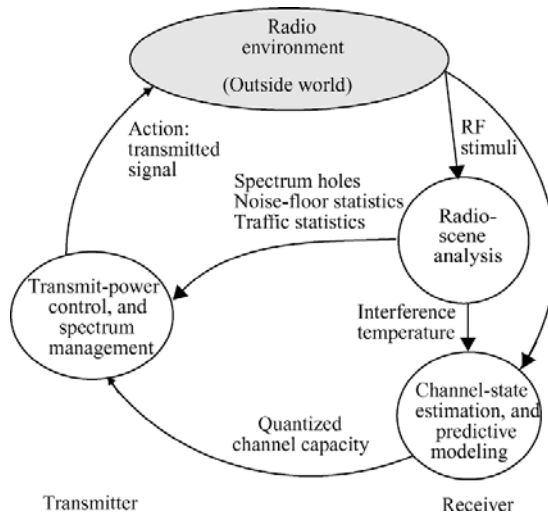
Pada Gambar 1 diketahui bahwa radio kognitif memungkinkan penggunaan spektrum yang tidak terpakai secara temporal yang disebut sebagai *spectrum hole* atau *white space*. *Spectrum hole* adalah band frekuensi yang ditugaskan untuk pengguna primer tetapi pada waktu dan lokasi geografis tertentu tidak dimanfaatkan oleh pengguna tersebut.

Dari Gambar 2 dapat dilihat operasi radio kognitif yang menunjukkan tiga fundamental tugas kognitif yang dapat dikategorikan sebagai berikut:

- a. *Radio-scene analysis*, yang meliputi:
  - Estimasi dari interferensi suhu pada lingkungan radio;
  - Deteksi dari *spectrum hole*.
- b. *Channel identification*, yang meliputi:
  - Estimasi dari *channel-state information* (CSI);
  - Prediksi dari kapasitas saluran yang digunakan pemancar
- c. Pengaturan daya pancar dan manajemen *dynamic spectrum*.

Proses *sensing* dari lingkungan luar (*outside world*) akan menentukan kehadiran dari *spectrum hole*. Sebelum radio kognitif beroperasi maka perlu dilakukan identifikasi dan pengumpulan informasi yang terdapat pada lingkungan. Pengamatan yang dilakukan oleh *sensing* diproses dalam siklus perencanaan yang digunakan

selanjutnya. Hal ini dapat dilakukan oleh radio kognitif dengan kemampuan *cognitive capability*. Kemampuan ini dapat mengindera dan mengumpulkan informasi dari jaringan lingkungannya. Pengamatan yang dilakukan dapat digunakan untuk menganalisis aliran kerja yang dapat mengumpulkan informasi seperti *bandwidth*, frekuensi, daya, modulasi dan lain-lain. Selanjutnya dengan *reconfigurability* pengguna CR yang telah mengumpulkan informasi yang diperlukan dari lingkungan mereka dapat mengubah parameter transmisi mereka secara dinamik menurut hasil *sensing* dari lingkungan tersebut sehingga dapat mencapai kinerja yang optimal.



**Gambar 2** Dasar Lingkaran Kognitif [2]

Dalam kognitif radio ada dua hal penting yang perlu diketahui yakni pertama bagaimana mendeteksi ketersediaan sumber daya dalam penginderaan spektrum untuk mencari *resource mining* dan kedua bagaimana mengalokasikan sumber daya yang tersedia ke pengguna kognitif yang berbeda-beda dalam hal *resource allocation* [3].

Radio kognitif memiliki beberapa fungsionalitas yang dapat melakukan kemampuan dalam kognitif dan rekonfigurasi secara terus menerus yakni sebagai berikut:

- a. *Spectrum sensing*, yaitu mekanisme untuk mendeteksi kekosongan spektrum agar pemanfaatan frekuensi tidak mengganggu pengguna primer.
- b. *Spectrum management* dan *handoff*, yaitu kemampuan pengguna sekunder untuk memilih band frekuensi terbaik dan melakukan *hopping* antara *multiple band* berdasarkan pada karakteristik *time varying channel* untuk memenuhi *Quality of Service* (QoS).
- c. *Spectrum mobility*, yaitu kemampuan untuk keluar dari saluran yang dipakai ketika pengguna primer terdeteksi. Secara langsung, saat pengguna sekunder mampu mengalihkan transmisinya ke frekuensi lain yang tersedia berdasarkan pada level *noise* dan interferensi, *pathloss*, *channel error rate*, *holding time* dan lain-lain.
- d. *Spectrum allocation* dan *sharing*, kemampuan untuk melakukan koordinasi untuk mengakses saluran yang dipakai dengan pengguna yang lainnya dengan pengguna sekunder lainnya, pengguna primer atau keduanya.

## 2. *Matched Filter Detection*

Salah satu teknik yang digunakan untuk mengidentifikasi suatu sinyal adalah *matched filter*. Syarat untuk menggunakan *matched filter* ini pada sisi penerima adalah sinyal yang akan difilter haruslah yang mempunyai informasi yang lengkap mengenai parameter-parameter yang digunakannya. Parameter-parameternya antara lain skema modulasi, frekuensi kerja, daya pancar, filter yang digunakan dan lain sebagainya. Kelebihan menggunakan teknik ini adalah sangat optimal untuk memperbesar nilai SNR jika *noise* yang mempengaruhi adalah White Gaussian Noise atau yang lebih dikenal dengan AWGN.



**Gambar 3** Blok diagram *Matched Filter Detection*[5]

Dari Gambar 3 sinyal  $s(t)$  adalah sinyal yang dipancarkan oleh pemancar tanpa melalui kanal transmisi. Setelah sinyal ini melalui kanal transmisi dan bercampur dengan *noise* sinyal ini diterima pada sisi penerima. Sinyal  $r(t)$  yang merupakan sinyal terima memiliki keadaan

sesuai dengan hipotesis pada Persamaan (2.2) dan Persamaan (2.3). Sinyal ini akan diinputkan ke *matched filter* untuk diproses dan ditentukan keberadaan PU-nya. Konsep *matched filter* ini ekuivalen dengan sinyal  $r(t)$  yang dikonvolusi dengan *template* sinyal yang telah dicerminkan[5].

$$conv = r(t) * s(T - t + \tau) \quad (1)$$

Dimana  $T$  merupakan durasi sinyal  $r(t)$  dan  $\tau$  adalah pergeseran *template*. Setelah melakukan konvolusi terhadap *template*, hasil konvolusi harus disampling setiap  $T$  agar keluarannya dapat dibandingkan dengan level *threshold*. Keluaran dari *matched filter* yang telah dibandingkan dengan level *threshold* ( $\lambda$ ) untuk menentukan keberadaan PU dalam spektrum. Berbeda dengan metode deteksi lainnya, *matched filter* membutuhkan informasi yang lengkap mengenai parameter-parameter suatu sinyal yang akan diproses seperti tipe modulasi, orde filter, *pulse shaping*, dan format paket sinyal informasi. Untuk menghitung level *threshold* pada sinyal *matched filter* digunakan rumus probabilitas deteksi dan probabilitas *false alarm*. Penghitungan level *threshold* ini dimaksudkan untuk mendeteksi keberadaan *primary user* pada band dan mendeteksi kekosongan spektrum.

Untuk probabilitas deteksi dan probabilitas *false alarm* ini dapat dirumuskan pada persamaan:

$$P_d = Q\left(\frac{\lambda - E}{\sigma\sqrt{E}}\right) \quad (2)$$

$$P_{fa} = Q\left(\frac{\lambda}{\sigma\sqrt{E}}\right) \quad (3)$$

Dimana  $P_d$  adalah probabilitas deteksi,  $P_{fa}$  adalah probabilitas *false alarm*,  $Q$  adalah distribusi *Q-function*,  $\lambda$  adalah *threshold*,  $E$  adalah energy sinyal dan  $\sigma$  adalah akar dari variansi *noise*.

Untuk menghitung *Q-function* suatu nilai dapat digunakan persamaan:

$$Q(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) \quad (4)$$

Nilai  $x$  merupakan inputan yang akan dicari nilai  $Q$ -function-nya,  $erf$  merupakan fungsi *error function*. Dengan menurunkan Persamaan (2.6), level *threshold* dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$\lambda = \sigma\sqrt{E} Q^{-1}(P_{fa}) \quad (5)$$

Dimana  $P_{fa}$  adalah probabilitas *false alarm*,  $Q^{-1}$  adalah distribusi  $Q$  function invers,  $\lambda$  adalah *threshold*,  $E$  adalah energi sinyal dan  $\sigma$  adalah akar dari variansi *noise*.

Untuk menghitung nilai *threshold*, nilai  $P_{fa}$  harus ditentukan terlebih dahulu. Nilai  $P_{fa}$  yang diinputkan dapat diubah-ubah agar dapat dilihat perbedaan dan efeknya pada sistem. Nilai  $E$  dihitung berdasarkan dari sinyal hasil keluaran *matched filter*. Berikut persamaan yang digunakan untuk menghitung energi suatu sinyal diskrit[6].

$$E = \sum_{-\infty}^{\infty} |x[n]|^2 \quad (6)$$

Dimana  $x[n]$  merupakan suatu sinyal yang bernilai diskrit.

## 2.1 Pulse Shaping

Sebelum sinyal ditransmisikan sinyal informasi akan diubah dulu ke bentuk pulsa-pulsa informasi. Proses pengubahan sinyal inilah disebut dengan *pulse shaping*. Kebutuhan *pulse shaping* dalam dunia telekomunikasi adalah untuk meminimalisasi adanya *Inter Symbol Interference* (ISI) dari sinyal informasi yang dikirimkan. Tidak semua filter bisa digunakan sebagai *pulse shaping* filter karena filter yang digunakan haruslah filter yang tidak menimbulkan ISI. Ada beberapa filter yang digunakan sebagai *pulse shaping* filter, diantaranya adalah *Rectangular Filter*, *Raise Cosine Filter* dan *Root Raise Cosine Filter*.

## 2.2 Raise Cosine Filter

*Raise Cosine Filter* merupakan filter pada transmisi digital yang mempunyai kemampuan untuk meminimalisasi *Inter Symbol Interference* (ISI). *Raise Cosine* merupakan implementasi dari *Low Pass Nyquist Filter*. Dalam domain frekuensi, spektrum akan simetris pada waktu  $\frac{1}{2T}$ , dimana  $T$  merupakan periode simbol dari sistem komunikasi. Persamaan matematis filter ini dalam domain frekuensi dapat dilihat pada persamaan:



$$H(f) = \begin{cases} T, & |f| \leq \frac{1-\beta}{2T} \\ \frac{T}{2} \left[ 1 + \cos \left( \frac{\pi T}{\beta} \left[ |f| - \frac{1-\beta}{2T} \right] \right) \right], & \frac{1-\beta}{2T} < |f| < \frac{1+\beta}{2T} \\ 0, & \text{---} \end{cases} \quad (7)$$

Dimana  $\beta = \text{roll off factor}$  yang mempunyai nilai berkisar dari 0 sampai dengan 1, dan  $T$  merupakan periode simbol. Impuls respon dari filter ini dapat dituliskan menjadi

$$h(t) = \text{sinc} \left( \frac{t}{T} \right) \frac{\cos \left( \frac{\pi \beta t}{T} \right)}{1 - \frac{4\beta^2 t^2}{T^2}} \quad (8)$$

Persamaan di atas dapat diturunkan menjadi persamaan 2.20 berikut ini.

$$h(t) = \left( \frac{\sin(\pi t/T)}{\pi t/T} \right) \left( \frac{\cos(\beta \pi t/T)}{1 - (2\beta t/T)^2} \right), \quad t = -\infty \text{ sampai } \infty \quad (9)$$

### 2.3 Matched Filter

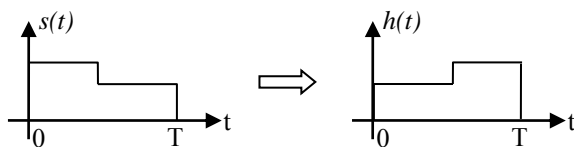
*Matched filter* merupakan sebuah filter pada sisi penerima yang bekerja dengan cara mengkorelasikan sinyal yang diterima dengan template sinyal. Ini dapat dicapai dengan cara melakukan konvolusi antara sinyal yang diterima dengan *template* yang sudah dicerminkan terhadap sumbu 0 nya kemudian digeser sepanjang  $T$ . *Template* sinyal merupakan filter yang sama yang digunakan pada sisi pemancar.  $T$  merupakan periode *template* itu sendiri. *Matched filter* ini merupakan filter yang paling optimal yang digunakan untuk memperbesar SNR, tetapi filter ini juga mempunyai kelemahan yaitu filter akan berfungsi optimal jika kanal yang dilewati adalah *Additive White Gaussian Noise* (AWGN).

Untuk persamaan dari *matched filter* ini dapat dinyatakan sebagai:

$$z(t) = h(t) * r(t) \quad (10)$$

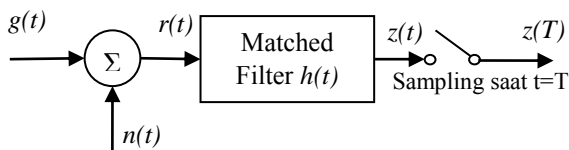
Dimana  $z(t)$  adalah sinyal keluaran *matching filter*,  $h(t)$  adalah respon impuls *matched filter*,  $r(t)$  adalah sinyal masukan *matched filter*.

Respon impuls yang digunakan pada *matched filter* adalah filter yang digunakan pada sisi transmitter yang kemudian dicerminkan dan digeser sampai  $T$ . Respon impuls yang digunakan pada *matched filter* tampak pada Gambar 4.



**Gambar 4** Respon Impuls Matched Filter

Secara umum blok diagram *matched filter* dapat dilihat pada Gambar 5 berikut ini.



**Gambar 5** Blok Diagram Matched Filter

Dari Gambar 5 setelah sinyal  $r(t)$  dikonvolusi dengan respon impuls  $h(t)$ , *output* hasil konvolusi ini adalah  $z(t)$ . Untuk mendapatkan nilai *output* dari *matched filter* ini, sinyal  $z(t)$  harus disampling saat  $t=T$ . Sinyal yang telah disampling  $z(T)$  adalah sinyal *output* dari *matched filter*.

## 2.4 Additive White Gaussian Noise (AWGN)

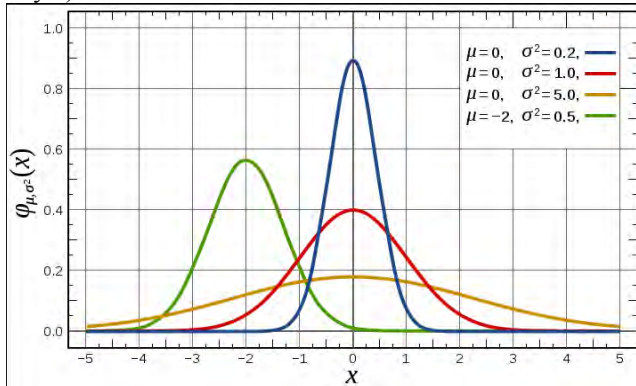
*Noise* bisa dinyatakan sebagai sinyal elektrik yang muncul secara random dan tidak terprediksi yang berasal dari dalam dan luar. Ketika suatu variabel (nilai) random ditambahkan ke informasi yang dibawa oleh sebuah sinyal, informasi tersebut mungkin sekali akan mengalami perubahan atau suatu kondisi terburuk dapat terjadi dimana informasi tersebut tidak dapat dikenali sesuai bentuk aslinya. *Noise* merupakan hal yang bersifat khusus dan tidak dapat dieliminir sepenuhnya. Pada kanal transmisi *noise* AWGN adalah *noise* yang pasti terjadi dalam jaringan *wireless* manapun yang memiliki sifat-sifat *Additive*, *White* dan *Gaussian*. Sifat *additive* artinya *noise* ini dijumlahkan dengan sinyal. Sifat *white* artinya *noise* tidak bergantung pada frekuensi operasi sistem dan memiliki rapat daya konstan dan *Gaussian* artinya besaran tegangan *noise* memiliki rapat peluang terdistribusi *Gaussian*.

Dalam model kanal AWGN, kita selalu berasumsi bahwa tidak ada distorsi atau efek dari sumber lain. AWGN adalah model untuk *thermal noise* yang dihasilkan oleh gerakan elektron acak di penerima.

Dalam teori probabilitas, distribusi *Gaussian* adalah distribusi probabilitas kontinu yang sering digunakan sebagai pendekatan pertama untuk menjelaskan variabel real acak dengan dua parameter yaitu nilai rata-rata/*mean* ( $\mu$ ) dan *variance* ( $\sigma^2$ ). *Mean* menentukan lokasi pusat statistik dan *variance* menentukan lebar dari kurva distribusi tersebut. Kedua hal tersebut dapat dilihat dari Gambar 6. Proses acak *Gaussian*  $w(t)$  merupakan fungsi acak dengan harga  $w$  pada saat  $t$ , dan dikarakteristikan secara statistik dengan fungsi rapat probabilitas pdf *Gaussian* dinyatakan sebagai:

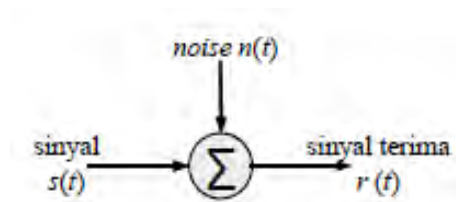
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (11)$$

Dimana  $f(x)$  adalah probabilitas kemunculan derai,  $\sigma$  adalah standar deviasi,  $\mu$  adalah *mean* (nilai rata-rata) dan  $x$  adalah variabel (daya sinyal).



**Gambar 6** PDF Gaussian

Dari Gambar 7 proses transmisi melalui kanal AWGN adalah berbentuk gelombang elektromagnetik, dimana sumber memancarkan sinyal  $s(t)$  kemudian saat ditransmisikan akan terkena noise  $n(t)$  dan diterima sebagai sinyal  $r(t)$ .



**Gambar 7** Model kanal AWGN

### 3. Teori Permainan (*Game Theory*)

*Game theory* adalah *mathematical tool* yang digunakan untuk memahami dan memodelkan situasi kompetitif yang mencantumkan interaksi dari pembuat keputusan yang rasional. Dalam perkembangan komunikasi modern bertambah banyaknya jumlah pengguna, aplikasi yang beragam, lingkungan provider yang berbeda-beda hingga sekarang ini membuat kebutuhan akan pengembangan teknologi dan standar yang menyediakan *dynamic automatic network selection* menjadi penting. *Game theory* ini dapat digunakan untuk mempelajari interaksi antara perilaku kooperatif atau kompetitif yang bisa diidentifikasi diantara pengguna dan *service provider* di wilayah tersebut. Komponen utama dalam sebuah *game* adalah pemain, aksi dan *payoff* [7]. Berikut ini pada Tabel 1 adalah *mapping* komponen dalam *game theory*.

**Tabel 1** Komponen *game theory*

Komponen <i>Game</i>	Keterangan
<i>Player</i> /Pemain	Agen yang bermain boleh <i>user</i> dan/atau <i>network</i>
Strategi	Rencana aksi yang diambil oleh pemain selama permainan berlangsung : ketersediaan/permintaan <i>bandwidth</i> , harga yang ditawarkan, dll
<i>Payoff</i>	Motivasi pemain yang merepresentasikan keuntungan atau estimasi menggunakan fungsi utilitas berdasarkan bermacam-macam parameter: <i>monetary cost</i> , kualitas, beban

	jaringan,dll
<i>Resources</i>	Resources yang digunakan/dimiliki pemain dalam permainan yang sedang dikompetisikan : <i>bandwidth</i> , daya, dll.

Pendekatan kategori dari setiap interaksi pemain dapat digolongkan dalam dua kategori yaitu pendekatan *cooperative*, dimana kategori ini mengikutsertakan pertimbangan untuk bergabung atau bekerjasama dengan pemain yang lain. Kedua pendekatan *non-cooperative* dimana pada kategori ini setiap pemain memilih strategi secara sendiri-sendiri. Untuk pendekatan *game theory* dapat dilihat dari Tabel 2 berikut.

**Tabel 2** Kategori pendekatan *game theory*

Interaksi Pemain	Pendekatan <i>game theory</i>	Objektif
<i>user vs user</i>	<i>non-cooperative</i>	<i>User</i> berkompetisi melawan <i>user</i> yang lain dan berusaha memaksimalkan utilitasnya sendiri
	<i>cooperative</i>	<i>User</i> bekerja sama untuk mendapatkan keuntungan (memaksimalkan kesejahteraan bersama)
<i>network vs user</i>	<i>non-cooperative</i>	<i>User</i> berkompetisi dengan jaringan, masing-masing berusaha meningkatkan utilitasnya sendiri. Di satu pihak <i>user</i> berusaha untuk memaksimalkan manfaat keuntungan mereka. Disisi lain, jaringan bertujuan untuk memaksimalkan keuntungan bagi

		penyedia jasa layanan
	<i>cooperative</i>	Kedua sisi bekerja sama untuk mencapai kepuasan bersama
<i>network vs network</i>	<i>non-cooperative</i>	<i>Network</i> saling berkompetisi untuk memaksimalkan pendapatan pribadi mereka
	<i>cooperative</i>	<i>Network</i> bekerja sama untuk mencapai kesejahteraan bersama yang maksimum

Fungsi utilitas menjadi tantangan yang berpengaruh terhadap bagaimana pemain akan memilih aksi mereka. Fungsi utilitas menjelaskan persepsi pemain terhadap performansi dan kepuasan. Semua pendekatan yang ada memiliki tujuan untuk optimasi jaringan dengan memaksimalkan nilai utilitas. Pada trafik heterogen, sejumlah aplikasi yang berbeda dengan persyaratan yang berbeda membuat definisi fungsi utilitas menjadi kompleks. Untuk tipe layanan yang berbeda-beda maka fungsi utilitas didefinisikan untuk menjelaskan kepuasan pelanggan dengan parameter QoS tertentu.

### 3.1 *Non-cooperative game theory for Cooperative Sensing*

*Throughput* dari setiap pengguna *sensing* ketika pengguna primer tidak ada dan ketika tidak ada alarm palsu yang dibangkitkan ( $R_{H_0}(T_s)$ ) adalah

$$R_{H_0}(T_s) = \frac{T-T_s}{T}(1 - P_{FA})C_{H_0} \quad (12)$$

Dimana  $C_{H_0}$  adalah *data rate* dari pengguna sekunder dibawah  $H_0$ . Ketika pengguna primer ada tetapi deteksinya hilang, maka *throughput* dari setiap pengguna *sensing* ( $R_{H_1}(T_s)$ ) adalah

$$R_{H_1}(T_s) = \frac{T-T_s}{T}P_{MD}C_{H_1} \quad (13)$$

Dimana  $C_{H_1}$  adalah *data rate* dari pengguna sekunder ditawarkan dibawah  $H_1$ .

Jika diasumsikan bahwa  $p_{H_0}$  adalah probabilitas bahwa pengguna primer tidak ada. Maka total *throughput* dari pengguna sekunder ( $R(T_s)$ ) adalah

$$R(T_s) = \rho_{H_0} R_{H_0}(T_s) + (1 - \rho_{H_0}) R_{H_1}(T_s) \quad (14)$$

Jika diasumsikan bahwa  $\rho_{H_0} \approx 1$  dan  $C_{H_1} \ll C_{H_0}$ . Oleh karena itu, *throughput* yang terjangkau dapat dikira-kira sebagai berikut:

$$R(T_s) \approx \rho_{H_0} R_{H_0}(T_s) \quad (15)$$

Misalkan  $S_{cs} = \{S_1, S_2, \dots, S_J\}$  diatur pada pengguna sekunder yang berpartisipasi pada *cooperative sensing*, dimana  $J$  adalah nomor pengguna yang melakukan *sensing*, yakni pengguna *heavy traffic* dan pengguna *light traffic*.  $K_1$  adalah jumlah pengguna *heavy traffic* dan  $K_2$  adalah jumlah pengguna *light traffic*.

#### a. Pengguna Heavy Traffic

Untuk pengguna trafik padat, jika memutuskan untuk menjadi pengguna *sensing* terhadap  $K_1 - 1$  pengguna trafik padat lainnya, maka rata-rata *payoff*-nya dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$U_{ht,s}(J) = U_0 \left(1 - \frac{\tau}{J}\right) - \frac{\sigma\tau}{J} - e_{txt} \left(1 - \frac{\tau}{J}\right) \quad J \in [1, K_1 + K_2] \quad (16)$$

dimana  $\frac{\tau}{T}$ ,  $U_0 = \rho_{H_0} (1 - \hat{P}_{FA}) C_{H_0}$ ,  $\hat{P}_{FA} = (1 - \prod_{i=1}^J P_{FA,i})$ ,

$i$  adalah indeks pengguna diantara semua pengguna *sensing*.  $\sigma$  adalah energi yang dikonsumsi per unit dari waktu yang diperlukan untuk melakukan *sensing*.  $e_{txt}$  menunjukkan konsumsi energi per unit dari waktu yang diperlukan untuk mentransmisikan data. Diasumsikan bahwa durasi *sensing* untuk pengguna *heavy traffic* dan *light traffic* yang berkontribusi pada *cooperative sensing* adalah sama.

Jika memutuskan untuk tidak melakukan *sensing*, maka rata-rata *payoff*-nya menjadi:

$$U_{ht,ns}(J) = \begin{cases} U_0 - e_{txt} & \text{if } J \in [1, K_1 + K_2 - 1] \\ 0 & \text{if } J = 0 \end{cases} \quad (17)$$

Jika *payoff* yang diterima sebagai pengguna *sensing* tanpa melakukan *cooperative sensing* lebih besar daripada *payoff* saat pengguna *sensing* berkontribusi dalam *cooperative sensing*, maka setiap pengguna sekunder akan cenderung menjadi *free rider*[7]. Sebaliknya, jika *payoff* menjadi pengguna *sensing* dalam *cooperative sensing* lebih

besar, maka semua pengguna sekunder akan melakukan strategi ini oleh karena itu tidak ada yang menjadi *free rider*. Jadi, sebagai ganti strategi murni ini, kita mempertimbangkan  $p_1$  sebagai probabilitas dari satu pengguna *heavy traffic* melakukan *sensing* dan  $p_2$  sebagai probabilitas dari satu pengguna *light traffic* melakukan *sensing*. Maka, utilitas rata-rata saat melakukan “sense” sebagai pengguna *heavy traffic* adalah:

$$\bar{U}_{ht,s} = \sum_{j_2=0}^{K_2} \sum_{j_1=0}^{K_1-1} \binom{K_2}{j_2} p_2^{j_2} (1-p_2)^{(K_2-j_2)} \binom{K_1-1}{j_1} p_1^{j_1} (1-p_1)^{(K_1-1-j_1)} U_{ht,s}(j_1 + j_2 + 1) \quad (18)$$

dimana,  $0 < p_1, p_2 < 1$  untuk  $0 < \tau < 1$ .

utilitas rata-rata saat melakukan “non sense” sebagai pengguna *heavy traffic* adalah:

$$\bar{U}_{ht,s} = \sum_{j_2=0}^{K_2} \sum_{j_1=0}^{K_1-1} \binom{K_2}{j_2} p_2^{j_2} (1-p_2)^{(K_2-j_2)} \binom{K_1-1}{j_1} p_1^{j_1} (1-p_1)^{(K_1-1-j_1)} U_{ht,ns}(j_1 + j_2) \quad (19)$$

### b. Pengguna Light Traffic

Jika memutuskan untuk menjadi pengguna *sensing* terhadap  $K_2 - 1$  pengguna trafik biasa lainnya, maka rata-rata *payoff*-nya dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$U_{lt,s}(J) = \begin{cases} U_o(1-\tau_i) - \frac{\sigma\tau}{J} - e_{txt}(1-\tau_i) & \text{if } J \in [1, K_1 + K_2] \text{ dan } \frac{\tau}{J} \leq \tau_i \\ U_o\left(1 - \frac{\tau}{J}\right) - \frac{\sigma\tau}{J} - e_{txt}\left(1 - \frac{\tau}{J}\right) & \text{if } J \in [1, K_1 + K_2] \text{ dan } \tau_i < \frac{\tau}{J} < 1 \end{cases} \quad (20)$$

dimana  $\tau_i = \frac{T_i}{T}$ . Jika memutuskan untuk tidak melakukan *sensing*, maka *payoff*-nya menjadi:

$$U_{ht,ns}(J) = \begin{cases} U_o(1-\tau_i) - e_{txt}(1-\tau_i) & \text{if } J \in [1, K_1 + K_2 - 1] \\ 0 & \text{if } J = 0 \end{cases} \quad (21)$$

Utilitas rata-rata saat melakukan “sense” sebagai pengguna *light traffic* adalah:

$$\bar{U}_{lt,s} = \sum_{j_2=0}^{K_2-1} \sum_{j_1=0}^{K_1} \binom{K_2-1}{j_2} p_2^{j_2} (1-p_2)^{(K_2-1-j_2)} \binom{K_1}{j_1} p_1^{j_1} (1-p_1)^{(K_1-j_1)} U_{lt,s}(j_1 + j_2 + 1) \quad (22)$$



dan utilitas rata-rata saat melakukan “non sense” sebagai pengguna *light traffic* adalah:

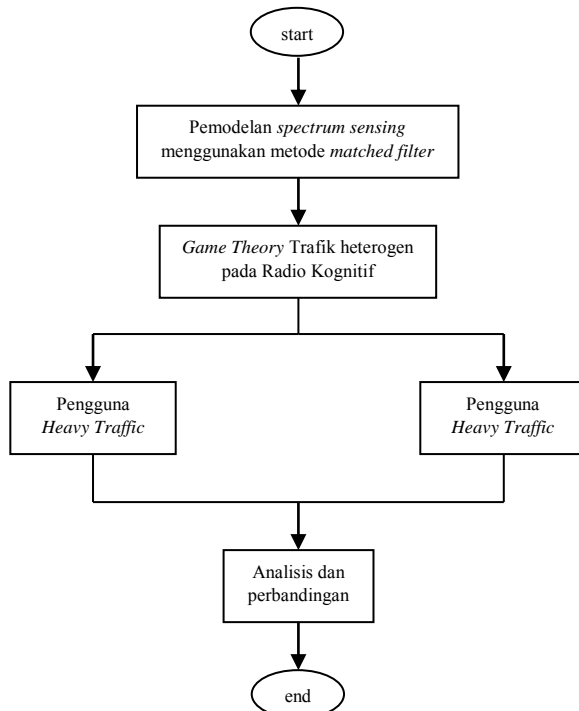
$$\bar{U}_{lt,ns} = \sum_{j_2=0}^{K_2-1} \sum_{j_1=0}^{K_1} \binom{K_2-1}{j_2} p_2^{j_2} (1-p_2)^{(K_2-1-j_2)} \binom{K_1}{j_1} p_1^{j_1} (1-p_1)^{(K_1-j_1)} U_{lt,ns}(j_1 + j_2) \quad (23)$$

## H. Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur  
Pada tahap ini akan dipelajari secara rinci hal-hal sebagai berikut:
  - a. Jaringan dan komunikasi radio kognitif
  - b. Penginderaan spektrum menggunakan metode deteksi *matched filter*.
  - c. Pemodelan *game theory* pada pengguna *light traffic* dan pengguna *heavy traffic*.
  - d. Penggunaan perangkat lunak MATLAB versi 8.0.0.783 dengan nama rilis R2012b untuk implementasi poin-poin diatas.
2. Simulasi  
Simulasi Penginderaan Spektrum Terdistribusi untuk Jaringan Radio kognitif pada Trafik Heterogen ini dilakukan menggunakan bahasa pemograman MATLAB versi 8.0.0.783
3. Pengolahan data hasil simulasi dan analisa  
Melakukan pengolahan data dan analisa yang diperoleh dari hasil simulasi.
4. Penarikan kesimpulan  
Kesimpulan mengenai Penginderaan Spektrum Terdistribusi untuk Jaringan Radio kognitif pada Trafik Heterogen dapat diambil dengan melihat hasil komputasi dan analisa.
5. Penulisan buku tugas akhir  
Pada tahap akhir semua tahap yang telah dilalui akan ditulis dalam buku tugas akhir yang mencakup seluruh materi yang ada.

Secara umum tahap perancangan sistem dapat dilihat dari Gambar 8.



**Gambar 8** Flowchart Metodologi Pengerjaan Tugas Akhir

## I. Jadwal Kegiatan

Berikut jadwal kegiatan yang akan dilakukan :

Kegiatan	Minggu															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Studi Literatur	■	■														
Pemodelan Sistem			■	■	■	■	■	■								
Simulasi						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Analisa Data dan Pembahasan									■	■	■	■	■	■	■	■
Penulisan buku Tugas Akhir									■	■	■	■	■	■	■	■

## **J. Daftar Pustaka**

- [1] Mitola, J., "Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications", Proc. of IEEE Workshop on Mobile Multimedia Communication, pp. 3-10, 1999.
- [2] Haykins, S., "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications", Proc. of IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 23, No. 2, February 2005.
- [3] Qiu, R.C., Hu, Z., Li, H., Wicks, M.C., "Cognitive Radio Communications and Networking", Wiley, 2012.
- [4] Akyildiz, I.F., Lee, W.Y., Vuran, M.C., Mohanty, S., "Next Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A survey", Computer Networks, Sept. 2006.
- [5] Ejaz, W., Hasan, N., Azam, M.A., and Kim, H.S., "Improved local spectrum sensing for cognitive radio networks", EURASIP Journal on Advances in Signal Processing 2012.
- [6] Verma, P.K., Taluja, S., and Rajeshwar, L.D, "Performance analysis of Energy detection, Matched filter detection & Cyclostationary feature detection Spectrum Sensing Techniques", International Journal Of Computational Engineering Research (ijceronline.com) Vol. 2 Issue. 5
- [7] Maharjan, S., Yuen, C., Chew, Y.H., Zhang, Y., Gjessing, S., "Distributed Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks with Heterogeneous Traffic", Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies 3<sup>rd</sup> International Symposium on, 7-10 November 2010.

## LAMPIRAN B

### LISTING PROGRAM

```
close all;clc; clear all;
%Jumlah call dalam selang waktu T dimodelkan
dengan distribusi poisson
menggunakan 1 kanal
misal membangkitkan jumlah call dengan rata-rata
4 call dalam 1 jam
a=0;
i=1;
b=20; %iterasi
while i<=b
    c(i)=poissrnd(4,1,1);
    d=a+c(i);
    a=d;
    i=i+1;
end
d          %total 20 data sampling
n=d/b      %rata-rata sampling
m=ceil(n)

close all;clc; clear all;
%Waktu antar kedatangan dimodelkan dengan
distribusi eksponensial
menggunakan 1 kanal
misal rata-rata waktu antar kedatangan 5 menit
i=1;
a1=0;a2=0;a3=0;
a4=0;

while (i<=20)
    d=exprnd(5,4,1);
    c1(i)=d(1,1);
    tot1(i)=a1+c1(i);
    a1=tot1(i);

    c2(i)=d(2,1);
    tot2(i)=a2+c2(i);
```

```

a2=tot2(i);

c3(i)=d(3,1);
tot3(i)=a3+c3(i);
a3=tot3(i);

c4(i)=d(4,1);
tot4(i)=a4+c4(i);
a4=tot4(i);

i=i+1;
end

tt1=tot1(20)/20; tt1= ceil(tt1)
tt2=tot2(20)/20; tt2= ceil(tt2)
tt3=tot3(20)/20; tt3= ceil(tt3)
tt4=tot4(20)/20; tt4= ceil(tt4)

close all; clc; clear all;
%Durasi call dimodelkan dengan distribusi
eksponensial negatif
menggunakan 4 kanal
misal durasi call 10 menit
i=1;
a1=0;a2=0;a3=0;
a4=0;
% a5=0;

while (i<=20)
    d=exprnd(10,4,1);
    c1(i)=d(1,1);
    tot1(i)=a1+c1(i);
    a1=tot1(i);

    c2(i)=d(2,1);
    tot2(i)=a2+c2(i);
    a2=tot2(i);

```

```

c3(i)=d(3,1);
tot3(i)=a3+c3(i);
a3=tot3(i);

c4(i)=d(4,1);
tot4(i)=a4+c4(i);
a4=tot4(i);

i=i+1;
end

tt1=tot1(20)/20; tt1= ceil(tt1)
tt2=tot2(20)/20; tt2= ceil(tt2)
tt3=tot3(20)/20; tt3= ceil(tt3)
tt4=tot4(20)/20; tt4= ceil(tt4)

% Model Propagasi ECC 33 pada WIMAX

d=6.1048; % jarak Tx ke Rx (Km)
Pt=43; %dalam dBm
k=1.38*10^-23; %konstanta boltzman
T=40+273.15; %suhu perangkat
NF=7; %noise figure
fc=3.5; %frekuensi operasi dalam GHz
Gt=15;
Gr=-1;
Hb=32; %tinggi BS
Hr=1.5; %tinggi MS
N=192; %jumlah subcarrier
cp=1/4; %cyclic prefiks factor
Bsistem=5*10e6;
Afs=92.4+20*log10(d)+20*log10(fc);
Abm=20.41+9.83*log10(d)+7.894*log10(fc)+9.56*(log10(fc))^2;
Gb=log10(Hb/200)*(13.958+5.8*(log10(d))^2);
PL=Afs+Abm-Gb-Gr;
Pr=Pt+Gt+Gr-PL-10*log10(N);
No=10*log10(k*T)+10*log10(Bsistem)+NF;
snr=Pr-No

```

```

% Spectrum Sensing menggunakan matched filter
close all; clc; clear all;
% Inisialisasi input
time=3.2e-6;
f=5e9;
fs=3*5e9;
n=1000;
jsc=192; %jumlah subcarrier
in=rand(1,n)>0.5;
in=in*2-1; % modulasi BPSK
jsi=ceil(n/jsc);
in=[in zeros(1,jsc*jsi-n)];
isc=reshape(in,jsc,[]);

% Menentukan Pilot
pil=ones(1,jsi); %Serial to Parallel
isc=[pil;isc(1:24,:);pil;isc(25:48,:);pil;isc(49:72,:);pil;isc(73:96,:)...

;pil;isc(97:120,:);pil;isc(121:144,:);pil;isc(145:168,:)...
;pil;isc(169:192,:)];
%menggunakan 8 pilot dan 192 subcarrier
isc=isc';

% Menerapkan IFFT pada masing-masing subcarrier
Ni=256; % panjang IFFT
oif=ifft(isc,Ni);
ooif=reshape(oif,1,[]); % Parallel to Serial

% Raised cosine filter
rcf=rcosine(4,40,'normal',0.3,1); %respon impuls

% Sinyal baseband melewati raised cosine filter
orcf=rcosflt(ooif,4,40,'normal',0.3,1);
orcf=orcf(1:length(orcf));

%-----
-----%

```

```

% Melewati kanal AWGN
snr=-14;
sa=awgn(orcf,snr);
% Noise AWGN
no=sa-orcf;
%-----
-----%

% Matched filter
ris=rcf;
omf=conv(ris,sa); %proses match filter dengan
mengkonvolusi sinyal yg diterima dengan respon
impuls

% Noise output matched filter
omf=omf(10:10:length(omf)); %sampling setiap 10
% sample
omf=omf(1:length(omf)-(length(omf)-
length(ooif)));
% pemotongan sinyal yg mengganggu

% Menghitung Energy
E=sum(abs(omf).^2);
E=E/length(omf);

% Menentukan threshold
pfa=0.01;
std=std(no);
% var=var(no);
thres=std*sqrt(E)*qfuncinv(pfa)
thresli=thres*ones(1,length(omf));
pd=qfunc((thres-E)./(std.*sqrt(E)))

% Plot figure
% Plot Sinyal OFDM
figure(1)
plot(0:length(ooif)-1,real(ooif))
xlabel('Time')
ylabel('Amplitudo')

```



```

title('Sinyal OFDM')
grid on

% Plot Raise Cosine filter
figure(2)
plot(0:length(rcf)-1,rcf,'b','Linewidth',2)
xlabel('Time')
ylabel('Amplitudo')
title('Raise Cosine Filter')
grid on

% Plot sinyal OFDM Raise Cosine
figure(3)
plot(0:length(orcf)-1,orcf)
xlabel('Time')
ylabel('Amplitudo')
title('Sinyal OFDM melewati Raise Cosine Filter')
grid on

% Plot noise AWGN
% figure(4)
plot(0:length(no)-1,no)
xlabel('Time')
ylabel('Amplitudo')
title('Noise AWGN')
grid on

% Plot Sinyal dengan Noise AWGN
% figure(5)
plot(0:length(sa)-1,sa)
xlabel('Time')
ylabel('Amplitudo')
title('Sinyal OFDM dengan Noise AWGN')
grid on
% Plot Sinyal Output Matched Filter
figure(6)
omf=omf(6:length(omf)-5)
plot(0:length(omf)-1,omf)

```

```

xlabel('Time')
ylabel('Amplitudo')
title('Sinyal Matched Filter')
grid on

% Plot Sinyal Output Matched Filter dengan
%Threshold
figure(7)
omf=omf(6:length(omf)-5);
plot(0:length(omf)-1,omf)
hold on
plot(0:length(thresli)-1,thresli,'r')
xlabel('Time')
ylabel('Amplitudo')
title('Sinyal Matched Filter + Threshold')
grid on
legend('sinyal matched filter','level
threshold')

close all;clear all;clc;
% Grafik perbandingan Pd dengan SNR dengan Pfa
sebesar 0.001
x=xlsread('tab1.xlsx','Sheet1','A2:A52');
y=xlsread('tab1.xlsx','Sheet1','B2:B52');
figure(1)
plot(x,y,'--mo','Linewidth',2)
xlabel('SNR(dB)')
ylabel('Probability Detection(Pd)')
title('MF under AWGN')
grid on

% Grafik perbandingan Pfa dengan level Threshold
SNR 10dB
x=xlsread('tab1.xlsx','Sheet1','D2:D12'); %
Nilai Pfa
y=xlsread('tab1.xlsx','Sheet1','E2:E12'); %
Level Threshold
figure(2)
plot(y,x,'--mo','Linewidth',2)

```

```

axis auto
set(gca,'XTick',[-0.5 -0.4 -0.3 -0.2 -0.1 0
0.1...
0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1])
xlabel('Level Threshold')
ylabel('Probability False Alarm (Pfa)')
title('MF under AWGN')
grid on

% Grafik perbandingan Pd dengan level Threshold
SNR 10dB
figure(3)
x=xlsread('tabl.xlsx','Sheet1','E2:E12'); %
Level Threshold
y=xlsread('tabl.xlsx','Sheet1','F2:F12'); %
Nilai Pd
plot(x,y,'--mo','Linewidth',2)
axis auto
set(gca,'XTick',[-0.5 -0.4 -0.3 -0.2 -0.1 0
0.1...
0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1])
xlabel('Level Threshold')
ylabel('Probability Detection')
title('MF under AWGN')
grid on

% Grafik perbandingan Pd dan Pfa
pf=xlsread('tabl.xlsx','Sheet1','H3:H104'); %
Level Threshold
pd1=xlsread('tabl.xlsx','Sheet1','I3:I104'); %
Nilai Pd SNR -20dB
pd2=xlsread('tabl.xlsx','Sheet1','J3:J104'); %
Nilai Pd SNR -10dB
pd3=xlsread('tabl.xlsx','Sheet1','K3:K104'); %
Nilai Pd SNR 0dB
pd4=xlsread('tabl.xlsx','Sheet1','L3:L104'); %
Nilai Pd SNR 10dB
pd5=xlsread('tabl.xlsx','Sheet1','M3:M104'); %
Nilai Pd SNR 20

```

```

figure(4)
plot(pf,pd1,'-r.','Linewidth',2)
hold on
plot(pf,pd2,'-g.','Linewidth',2)
plot(pf,pd3,'-b.','Linewidth',2)
plot(pf,pd4,'-c.','Linewidth',2)
plot(pf,pd5,'-m.','Linewidth',2)
axis([0 1 0 1])
legend('SNR -20dB','SNR -10dB','SNR 0dB','SNR
10dB','SNR 20dB')
xlabel('Probability of False Alarm (Pfa)')
ylabel('Probability Detection (Pd)')
title('MF under AWGN')
grid on

%heavy traffic users
%payoff melakukan sensing
ph0=0.99; % probabilitas bahwa pengguna primer
tidak ada
pfa=0.8939; % probabaility of false alarm dengan
aturan or
ch0=1.41e6;
U_0=ph0*(1-pfa)*ch0;
tau=0.5;%perbandingan durasi sensing setiap
frame dengan durasi setiap frame
sigma=0.4;%energi yang dikonsumsi per unit dari
waktu melakukan sensing
e_txt=0.2;%energi yang dikonsumsi per unit dari
waktu melakukan transmisi data
J=[1:8];
Uht_s=U_0*(1-(tau./J))-(sigma*tau./J)-e_txt*(1-
(tau./J));
Uht_s
%%
%payoff tidak melakukan sensing
J=[0:8];Uht_ns=[];
for i=1:9
    if J[i]=0
        break

```

```

        else
            Uht_ns(i)=U_0-e_txt;
        end
    end
%%
Uht_ns
%
% light traffic users
% payoff melakukan sensing
Q=[1:8];
tau_i=0.4667;
for i=1:8
    if tau./Q(i) <= tau_i
        Ult_s(i)=U_0*(1-tau_i)-(sigma*tau./Q(i))-
e_txt*(1-tau_i);
    else
        Ult_s(i)=U_0*(1-(tau./Q(i)))-
(sigma*tau./Q(i))-e_txt*(1-(tau./Q(i)));
    end
end
Ult_s

%%
% payoff tidak melakukan sensing
J=[0:8];Ult_ns=[];
for i=1:9
    if J[i]=0
        break
    else
        Ult_ns(i)=U_0*(1-tau_i)-e_txt*(1-tau_i);
    end
end
Ult_ns

%men cari utilitas rata-rata
clear all;close all;clc
j1=0;
j2=0;
K1=4;%jumlah pengguna heavy traffic

```

```

K2=4;%jumlah pengguna light traffic
o=K1-1;
p=K2-1;
p1=0.5;%probabilitas pengguna heavy traffic
berpartisipasi sensing
p2=0.5;%probabilitas pengguna light traffic
memulih menjadi pengguna sensing
% average utility for pure strategy "sense" for
heavy traffic users
a=[0:K2]; c=[0:K1-1];
% a=[0:4]; c=[0:3];
i=1;ii=1;
U_hts= 130.6469;
% U_hts =[74050    111080];
% U_hts =[6700    10050    11167    11725];
% U_hts =[558    837.3    930.4    976.9
1004.8    1023.4];
% U_hts =[69.4450 104.4175 116.0750 121.9037
125.4010 127.7325 129.3979 130.6469];
while i<=K2+1
    while ii<=K1

x(ii)=[factorial(K2)/(factorial(a(i))*factorial(
K2-a(i)))*p2^a(i)*(1-p2)^(K2-a(i))...

*factorial(o)/(factorial(c(ii))*factorial(o-
c(ii)))*p1^c(ii)*(1-p1)^(K1-1-c(ii))*U_hts];
        ii=ii+1;
    end
    xt(i)=sum(x);
    xtot=sum(xt);
    Uht_s=xtot;
    i=i+1;
end
Uht_s
%%
% average utility for pure strategy "not sense"
for heavy traffic users
i=1;ii=1;
U_htns = 139.3900;

```

```

% U_htns =[0 148100];
% U_htns =[0 13400]
% U_htns =[0 1116.5 ]
% U_htns =[0 139.3900]
while i<=K2+1
    while ii<=K1

x(ii)=[factorial(K2)/(factorial(a(ii))*factorial(
K2-a(ii)))*p2^a(ii)*(1-p2)^(K2-a(ii))...

*factorial(o)/(factorial(c(ii))*factorial(o-
c(ii)))*p1^c(ii)*(1-p1)^(K1-1-c(ii))*U_htns];
        ii=ii+1;
    end
    xt(i)=sum(x);
    xtot=sum(xt);
    Uht_ns=xtot;
    i=i+1;
end
Uht_ns;
%%
%average utility for pure strategy "sense" for
light traffic users
a=[0:K2-1]; c=[0:K1];
% a=[0:3]; c=[0:4];
i=1;ii=1;
U_lts= 74.3054 ;
%U_lts= [740520 789840]
%U_lts= [6700 7146.3 7146.4 7146.4]
%U_lts= [558.0100 595.3151 595.3568 595.3776
595.3901 595.3984]
%U_lts= [69.4450 74.2117 74.2534 74.2742
74.2867 74.2950 74.3010 74.3054]

while i<=K2
    while ii<=K1+1

x(ii)=[factorial(p)/(factorial(a(ii))*factorial(p
-a(ii)))*p2^a(ii)*(1-p2)^(K2-1-a(ii))...

```

```

*factorial(K1)/(factorial(c(ii))*factorial(K1-
c(ii)))*p1^c(ii)*(1-p1)^(K1-c(ii))*U_lts];
    ii=ii+1;
end
    xt(i)=sum(x);
    xtot=sum(xt);
    Ult_s=xtot;
    i=i+1;
end
Ult_s
%%
% average utility for pure strategy "non sense"
for light traffic users
a=[0:K2-1]; c=[0:K1];
i=1;ii=1;
U_ltns= 74.3367
% U_ltns=[0 78984];
% U_ltns=[0 7146.5];
% U_ltns=[0 595.4401];
% U_ltns=[0 74.3367];

while i<=K2
    while ii<=K1+1

x(ii)=[factorial(p)/(factorial(a(i))*factorial(p
-a(i)))*p2^a(i)*(1-p2)^(K2-1-a(i))...

*factorial(K1)/(factorial(c(ii))*factorial(K1-
c(ii)))*p1^c(ii)*(1-p1)^(K1-c(ii))*U_ltns];
        ii=ii+1;
    end
    xt(i)=sum(x);
    xtot=sum(xt);
    Ult_ns=xtot;
    i=i+1;
end
Ult_ns

```



*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## LAMPIRAN C

### TABEL PENGUJIAN

Dengan menetapkan nilai  $P_{fa}$  sebesar 0,001 dan melakukan perubahan SNR dari -25dB sampai 25 dB sehingga didapatkan  $P_d$  sebagai berikut :

**Tabel C.1** SNR terhadap  $P_d$

SNR	$P_d$
-25	0.375
-20	0.4121
-15	0.4586
-10	0.499
-5	0.538
0	0.5597
4	0.5737
8	0.6021
12	0.6817
14	0.7302
16	0.8236
20	0.9751
25	1

Pengujian yang dilakukan selanjutnya adalah menghitung level *threshold* dan  $P_d$  dengan menetapkan nilai SNR sebesar 10dB dan melakukan perubahan-perubahan nilai  $P_{fa}$  dari rentang 0 sampai 0,8

**Tabel C.2**  $P_{fa}$  vs *Threshold* vs  $P_d$

$P_{fa}$	<i>Threshold</i>	$P_d$
0.01	0.9785	0.844
0.05	0.6346	0.925
0.1	0.5038	0.972

$P_{fa}$	Threshold	$P_d$
0.2	0.3259	0.991
0.3	0.2081	0.995
0.4	0.1028	0.999
0.5	0	0.999
0.6	-0.0999	1
0.7	-0.2171	1
0.8	-0.3485	1
0.9	-0.4924	1

Pengujian selanjutnya adalah menghitung  $P_{fa}$  dan  $P_d$  dengan kondisi sistem yang mempunyai perubahan SNR dari -20dB sampai 20dB

**Tabel C.3**  $P_{fa}$  terhadap SNR (-20dB sampai dengan 20dB)

$P_{fa}$	$P_d$				
	SNR -20dB	SNR -10dB	SNR 0 dB	SNR 10dB	SNR 20dB
0	0	0	0	0	0
0.001	0.4121	0.499	0.5977	0.6543	0.9725
0.01	0.704	0.7176	0.7413	0.8905	0.9989
0.02	0.7784	0.815	0.8627	0.9024	0.9994
0.03	0.8487	0.8599	0.8967	0.9141	0.9994
0.04	0.8548	0.8813	0.9129	0.9232	0.9997
0.05	0.8795	0.9124	0.9189	0.9321	0.9997
0.06	0.9238	0.9376	0.9386	0.9422	0.9998
0.07	0.9422	0.9456	0.9498	0.953	0.9998
0.08	0.9508	0.9547	0.9548	0.9643	0.9999
0.09	0.9545	0.9601	0.9637	0.9679	0.9999
0.1	0.9552	0.9617	0.964	0.97	1

$P_{fa}$	$P_d$				
	SNR -20dB	SNR -10dB	SNR 0 dB	SNR 10dB	SNR 20dB
0.11	0.9599	0.9639	0.9666	0.9719	1
0.12	0.9637	0.9652	0.9677	0.9744	1
0.13	0.9641	0.9674	0.9696	0.9751	1
0.14	0.9663	0.9675	0.9713	0.9765	1
0.15	0.9682	0.97	0.9743	0.9801	1
0.16	0.9697	0.972	0.9764	0.984	1
0.17	0.9728	0.9777	0.9785	0.9846	1
0.18	0.9759	0.9786	0.9833	0.9858	1
0.19	0.9723	0.9827	0.984	0.9909	1
0.2	0.9815	0.9848	0.9861	0.9913	1
0.21	0.9862	0.9849	0.9874	0.9924	1
0.22	0.9898	0.9911	0.9914	0.9933	1
0.23	0.9906	0.9913	0.9917	0.9937	1
0.24	0.9907	0.9924	0.9926	0.9937	1
0.25	0.9918	0.9922	0.9928	0.9939	1
0.26	0.9921	0.9929	0.9931	0.994	1
0.27	0.9922	0.9932	0.9938	0.9942	1
0.28	0.9923	0.9935	0.9946	0.9951	1
0.29	0.9926	0.9939	0.9947	0.9952	1
0.3	0.9934	0.9944	0.995	0.9961	1
0.31	0.9941	0.9946	0.9956	0.9961	1
0.32	0.9942	0.995	0.996	0.9961	1
0.33	0.9943	0.9952	0.9964	0.9963	1
0.34	0.9948	0.9957	0.9965	0.9967	1
0.35	0.9953	0.996	0.9966	0.9968	1
0.36	0.9955	0.9963	0.9968	0.9971	1

$P_{fa}$	$P_d$				
	SNR -20dB	SNR -10dB	SNR 0 dB	SNR 10dB	SNR 20dB
0.37	0.996	0.9966	0.9969	0.9976	1
0.38	0.9966	0.997	0.997	0.9979	1
0.39	0.9968	0.997	0.9971	0.9983	1
0.4	0.9972	0.9973	0.9974	0.9988	1
0.41	0.9974	0.9976	0.9978	0.999	1
0.42	0.9976	0.998	0.9981	0.999	1
0.43	0.9977	0.9981	0.9982	0.9992	1
0.44	0.9978	0.9982	0.9983	0.9992	1
0.45	0.9979	0.9982	0.9983	0.9992	1
0.46	0.998	0.9982	0.9985	0.9992	1
0.47	0.9982	0.9984	0.9988	0.9994	1
0.48	0.9983	0.9986	0.9989	0.9995	1
0.49	0.9984	0.9987	0.9989	0.9995	1
0.5	0.9985	0.9987	0.999	0.9995	1
0.51	0.9986	0.9988	0.9992	0.9995	1
0.52	0.9987	0.9988	0.9993	0.9995	1
0.53	0.9988	0.999	0.9993	0.9995	1
0.54	0.9989	0.9991	0.9994	0.9995	1
0.55	0.999	0.9993	0.9995	0.9996	1
0.56	0.9991	0.9993	0.9995	0.9996	1
0.57	0.9992	0.9994	0.9996	0.9996	1
0.58	0.9993	0.9995	0.9996	0.9998	1
0.59	0.9993	0.9995	0.9996	0.9998	1
0.6	0.9994	0.9996	0.9997	0.9998	1
0.61	0.9995	0.9996	0.9997	0.9998	1
0.62	0.9995	0.9996	0.9997	0.9998	1

$P_{fa}$	$P_d$				
	SNR -20dB	SNR -10dB	SNR 0 dB	SNR 10dB	SNR 20dB
0.63	0.9996	0.9997	0.9997	0.9998	1
0.64	0.9996	0.9997	0.9997	0.9999	1
0.65	0.9996	0.9997	0.9998	0.9999	1
0.66	0.9997	0.9997	0.9998	1	1
0.67	0.9997	0.9998	0.9998	1	1
0.68	0.9997	0.9998	0.9998	1	1
0.69	0.9998	0.9998	0.9998	1	1
0.7	0.9998	0.9998	0.9999	1	1
0.71	0.9998	0.9998	0.9999	1	1
0.72	0.9998	0.9999	0.9999	1	1
0.73	0.9998	0.9999	0.9999	1	1
0.74	0.9998	0.9999	0.9999	1	1
0.75	0.9999	0.9999	0.9999	1	1
0.76	0.9999	0.9999	0.9999	1	1
0.77	0.9999	0.9999	1	1	1
0.78	0.9999	0.9999	1	1	1
0.79	0.9999	0.9999	1	1	1
0.8	0.9999	1	1	1	1
0.81	0.9999	1	1	1	1
0.82	1	1	1	1	1
0.83	1	1	1	1	1
0.84	1	1	1	1	1
0.85	1	1	1	1	1
0.86	1	1	1	1	1
0.87	1	1	1	1	1
0.88	1	1	1	1	1

$P_{fa}$	$P_d$				
	SNR -20dB	SNR -10dB	SNR 0 dB	SNR 10dB	SNR 20dB
0.89	1	1	1	1	1
0.9	1	1	1	1	1
0.91	1	1	1	1	1
0.92	1	1	1	1	1
0.93	1	1	1	1	1
0.94	1	1	1	1	1
0.95	1	1	1	1	1
0.96	1	1	1	1	1
0.97	1	1	1	1	1
0.98	1	1	1	1	1
0.99	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1

Pengujian yang dilakukan selanjutnya adalah menghitung nilai  $P_d$  dan  $P_{fa}$  sistem dengan mengubah-ubah level threshold pada sistem dalam kondisi SNR sistem sebesar 10dB.

**Tabel C.4** Perbandingan level threshold dengan  $P_d$  dan  $P_{fa}$

<i>Threshold</i>	$P_d$	$P_{fa}$	<i>Threshold</i>	$P_d$	$P_{fa}$
1.00	0.9038	0.005	0.10	0.9999	0.3982
0.90	0.9408	0.0101	0.00	0.9999	0.5
0.80	0.9656	0.0196	-0.10	1	0.6018
0.70	0.9811	0.0355	-0.20	1	0.697
0.60	0.9902	0.0609	-0.30	1	0.7804
0.50	0.9952	0.0986	-0.40	1	0.8489
0.40	0.9978	0.1511	-0.50	1	0.9014
0.30	0.9991	0.2196	-	-	-
0.20	0.9996	0.303	-	-	-

**Tabel C.5** Payoff perubahan  $e_{txt}$  terhadap  $k_1$  dan  $k_2$

$$e_{txt} = 0.1, k_1 = 1, k_2 = 1$$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	166617	177720	209808	141516
0.8	0.2	148104	157973.33	197464	131642.67
0.7	0.3	129591	138226.667	182654	121769.33
0.6	0.4	111078	118480	167844	111896
0.5	0.5	92565	98733.33	153034	102022.67
0.4	0.6	74052	78986.67	138224	92149.33
0.3	0.7	55539	59240	123414	82276
0.2	0.8	37026	39493.33	108604	72402.67
0.1	0.9	18513	19746.67	93794	62529.33

$$e_{txt} = 0.1, k_1 = 2, k_2 = 2$$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	24082.75	26049.6	23517.5	18974.4
0.8	0.2	19028.25	20582.4	19832.5	16008
0.7	0.3	14568.25	15758.4	16415.25	13256.8
0.6	0.4	10703.25	11577.6	13266	10720
0.5	0.5	7432.9	8040	10385.25	8397.6
0.4	0.6	4757.05	5145.6	7772.05	6288.96
0.3	0.7	2675.85	2894.4	5427	4395.12
0.2	0.8	1189.25	1286.4	3349.975	15436.8
0.1	0.9	297.315	321.6	1540.975	1250.64

$$e_{txt} = 0.1, k_1 = 3, k_2 = 3$$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	2601.0667	2790.8571	2245.7500	1938.0857
0.8	0.2	1826.8167	1960.1143	1750.6667	1470.0000
0.7	0.3	1223.8022	1313.1429	1249.1167	1078.6286
0.6	0.4	770.6880	826.9221	877.5265	757.9873



$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.5	0.5	446.0000	478.5429	581.4783	502.4529
0.4	0.6	228.3520	245.0139	354.2805	306.2565
0.3	0.7	96.3360	103.3653	189.2334	163.6555
0.2	0.8	28.5440	30.6267	79.6373	68.9074
0.1	0.9	3.5680	3.8283	18.7927	16.2698

$$e_{txt} = 0.1, k_1 = 4, k_2 = 4$$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	379.6439	405.8780	306.3526	273.9945
0.8	0.2	237.0098	253.3876	208.0500	186.2096
0.7	0.3	138.9308	148.5312	134.5928	120.4290
0.6	0.4	74.9914	80.1734	81.7516	73.1662
0.5	0.5	36.1648	38.6639	45.5701	40.7950
0.4	0.6	14.8131	15.8367	22.4411	20.0952
0.3	0.7	4.6870	5.0108	9.0915	8.1436
0.2	0.8	0.9258	0.9919	2.4156	2.3144
0.1	0.9	0.0579	0.0619	0.3089	0.2769

$$e_{txt} = 0.3, k_1 = 1, k_2 = 1$$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	166617	177720	209808	141516
0.8	0.2	148104	157973.33	197464	131642.67
0.7	0.3	129591	138226.667	182654	121769.33
0.6	0.4	111078	118480	167844	111896
0.5	0.5	92565	98733.33	153034	102022.67
0.4	0.6	74052	78986.67	138224	92149.33
0.3	0.7	55539	59240	123414	82276
0.2	0.8	37026	39493.33	108604	72402.67
0.1	0.9	25918	19746.67	93794	62529.33

$$e_{txt} = 0.3, k_1 = 2, k_2 = 2$$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	24082.75	26049.6	23517.5	18974.4
0.8	0.2	19028.25	20582.4	19832.5	16008
0.7	0.3	14568.25	15758.4	16415.25	13256.8
0.6	0.4	10703.25	11577.6	13266	10720
0.5	0.5	7432.9	8040	10385.25	8397.6
0.4	0.6	4757.05	5145.6	7772.05	6288.96
0.3	0.7	2675.85	2894.4	5427	4395.12
0.2	0.8	1189.25	1286.4	3349.975	15436.8
0.1	0.9	297.315	321.6	1540.975	1250.64

$$e_{txt} = 0.3, k_1 = 3, k_2 = 3$$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	2590.6167	2790.3429	1810.0945	1937.6571
0.8	0.2	1819.4833	1959.7714	1379.6004	1469.7429
0.7	0.3	1218.9022	1312.8857	1017.5083	1078.3714
0.6	0.4	767.5920	826.7739	719.0903	757.8515
0.5	0.5	444.2083	478.4571	479.6000	502.3629
0.4	0.6	227.4347	244.9701	294.2924	306.2017
0.3	0.7	95.9490	103.3467	158.4229	163.6262
0.2	0.8	28.4293	30.6213	67.2472	65.0506
0.1	0.9	3.5537	3.8277	16.0211	15.3057

$$e_{txt} = 0.3, k_1 = 4, k_2 = 4$$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	379.0992	406.1696	306.1097	273.7765
0.8	0.2	236.6698	253.5697	207.8590	185.9428
0.7	0.3	138.7315	148.6379	134.4716	120.3204
0.6	0.4	74.8838	80.2310	81.6732	73.0958
0.5	0.5	36.1129	38.6916	45.5234	40.7532
0.4	0.6	14.7919	15.8481	22.4166	20.0732
0.3	0.7	4.6802	5.0144	9.0809	8.1341
0.2	0.8	0.9245	0.9905	2.5792	2.3110

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.1	0.9	0.0578	0.0619	0.3085	0.2765

$$e_{txt} = 0.4, k_1 = 1, k_2 = 1$$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	166617	177720	209808	141516
0.8	0.2	148104	157973.33	197464	131642.67
0.7	0.3	129591	138226.667	182654	121769.33
0.6	0.4	111078	118480	167844	111896
0.5	0.5	92565	98733.33	153034	102022.67
0.4	0.6	74052	78986.67	138224	92149.33
0.3	0.7	55539	59240	123414	82276
0.2	0.8	37026	39493.33	108604	72402.67
0.1	0.9	25918	19746.67	93794	62529.33

$$e_{txt} = 0.4, k_1 = 2, k_2 = 2$$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	24082.75	26049.6	50927	18973.6
0.8	0.2	19028.25	20582.4	41504	16008
0.7	0.3	14568.25	15758.4	33020	13256.8
0.6	0.4	10703.25	11577.6	25478.75	10720
0.5	0.5	7432.9	8040	18878.25	8396.8
0.4	0.6	4757.05	5145.6	13219.75	6288.8
0.3	0.7	2675.85	2894.4	8502.625	4395.04
0.2	0.8	1189.25	1286.4	4726.875	2715.6
0.1	0.9	297.315	321.6	1892.7	1250.64

$$e_{txt} = 0.4, k_1 = 3, k_2 = 3$$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	2590.3333	2790.0857	2245.1833	1937.4857
0.8	0.2	1819.2667	1959.6000	1702.5333	1469.6571
0.7	0.3	1218.7627	1312.8000	1248.8167	1078.2857
0.6	0.4	767.5056	826.6999	877.3015	757.7837

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.5	0.5	444.1583	478.4143	581.3297	502.3179
0.4	0.6	227.4091	244.9481	354.1902	306.1743
0.3	0.7	95.9382	103.3375	189.1853	163.6115
0.2	0.8	28.4261	30.6185	79.6171	68.8889
0.1	0.9	3.5533	3.8273	18.7880	16.2654

$$e_{txt} = 0.4, k_1 = 4, k_2 = 4$$

$p_1$	$p_2$	$\bar{U}_{ht,s}$	$\bar{U}_{ht,ns}$	$\bar{U}_{lt,s}$	$\bar{U}_{lt,ns}$
0.9	0.1	378.8269	405.8780	305.8897	273.5797
0.8	0.2	236.4997	253.3876	207.7096	185.8092
0.7	0.3	138.6318	148.5312	134.3750	120.2339
0.6	0.4	74.8300	80.1734	81.6145	73.0433
0.5	0.5	36.0870	38.6639	45.4907	40.7239
0.4	0.6	14.7813	15.8367	22.4004	20.0588
0.3	0.7	4.6769	5.0108	9.0744	8.1283
0.2	0.8	0.9238	0.9898	2.5774	2.3094
0.1	0.9	0.0577	0.0619	0.3082	0.2763

*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mitola, J., "Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications", Proc. of IEEE Workshop on Mobile Multimedia Communication, pp. 3-10, 1999.
- [2] Haykins, S., "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications", Proc. of IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 23, No. 2, February 2005.
- [3] Qiu, R.C., Hu, Z., Li, H., Wicks, M.C., "Cognitive Radio Communications and Networking", Wiley, 2012.
- [4] Akyildiz, I.F., Lee, W.Y., Vuran, M.C., Mohanty, S., "Next Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A survey", Computer Networks, Sept. 2006.
- [5] Zheng, Y., Liang, Y.C., Hoang, A.T., Zhang, R., "A review on Spectrum Sensing for Cognitive Radio: Challenges and Solutions", EURASIP Journal on Advances in Signal Processing Volume 2010, Article ID 381465.
- [6] Wyglinski, A.M., Nekovee, M., Hou, Y.T., "Cognitive Radio Communications and Networks", Elsevier, 2010.
- [7] Ejaz, W., Hasan, N., Azam, M.A., and Kim, H.S., "Improved local spectrum sensing for cognitive radio networks", EURASIP Journal on Advances in Signal Processing 2012.
- [8] Verma, P.K., Taluja, S., and Rajeshwar, L.D., "Performance analysis of Energy detection, Matched filter detection & Cyclostationary feature detection Spectrum Sensing Techniques", International Journal Of Computational Engineering Research (ijceronline.com) Vol. 2 Issue. 5
- [9] LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band", IEEE Std 802.11a-1999
- [10] Lui, H., and Li, G., "OFDM based broadband Wireless Networks, Design and Optimisation", Hoboken, New Jersey: A John Wiley & Sons, Inc., Publication,
- [11] Flood, J., "Telecommunications, Switching, Traffic and Networks", Prentice Hall, 1994.
- [12] Weiss, M., "WIMAX General information about the standard 802.16", Rohde & Schwarz, 2006.

- [13] Maharjan, S., Yuen, C., Chew, Y.H., Zhang, Y., Gjessing, S., “Distributed Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks with Heterogeneous Traffic”, Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies 3<sup>rd</sup> International Symposium on, 7-10 November 2010.
- [14] Maille, P., and Tuffin, B., “Why using Game Theory in communication networks? Introduction of game theory concepts”, IRISA Seminar on Network Economics, May 31, 2012.

## RIWAYAT HIDUP



**Saut Martua Jahenda Siringoringo** merupakan anak kedua dari dua bersaudara dari pasangan Posman Siringoringo dan Sintauli br. manik. Dilahirkan di Kabanjahe pada tanggal 4 Februari 1991, perjalanan pendidikannya dimulai dari TK Sint Yoseph ke SD Sint Yoseph selanjutnya ke SMPN 1 Kabanjahe serta melanjutkan ke SMAN 1 Kabanjahe.

Setelah menamatkan SMA, penulis melanjutkan studinya ke Jurusan Teknik Telekomunikasi D3 - UGM dan lulus tahun 2011. Selama berkuliah penulis telah menyelesaikan penelitian mengenai Sistem Komunikasi Jaringan Optik di PT.Telkom Medan. Kemudian Pada bulan Agustus 2012 penulis melanjutkan pendidikan sarjana di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, dan Pada bulan Januari 2015 mengikuti seminar dan ujian Tugas Akhir di Bidang Studi telekomunikasi Multimedia Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS Surabaya dengan mengambil tugas akhir di Laboratorium Komunikasi Multimedia B304 sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Elektro.



*[Halaman ini sengaja dikosongkan]*